

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ
KATEDRA TVÁŘENÍ MATERIÁLU



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Srovnání technologií tažení drátu přes průvlastky a přes kladky z technologického a
materiálového hlediska

Comparison of wire drawing technologies with dies and with rolls from the viewpoint of
technology and material properties

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamil Klepáč**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T034 Technologie tváření a úpravy materiálu
Téma: Srovnání technologií tažení drátu přes průvlastky a přes kladky z
technologického a materiálového hlediska
Comparison of wire drawing technologies with dies and with rolls from
the viewpoint of technology and material properties

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretické základy práce
3. Popis technologie
4. Návrh experimentu, popis experimentu a cíle práce
5. Analýza výsledků
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ENGHAG, P. *Steel wire technology*. Repro Örebro University, 2008, ISBN 91-631-1962-5.
- [2] MARCOL, J. *Tažený ocelový drát - 1 a 2 díl*, ŽDB 1996.
- [3] MUSKALSKI, Z. J. *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii ciągnięcia drutów ze stali wysokowęglowych*. Politechnika Częstochowska, 2011, ISBN 978-83-87745-14-1.
- [4] *Wire Forming Technology International*, www.wireformingtech.com
- [5] *Wire Journal International*, official publication of the Wire association international, www.wirenet.org.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Michal Brodňan

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 22.04.2016


prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 20.4.2016

Kamil Klapálek
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultaci a poskytnutí cenných rad při řešení této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Brodňanovi za poskytnutí potřebných informací ohledně praktické části této práce.

Abstrakt

Diplomová práce hodnotí dvě odlišné technologie tažení nízkouhlíkového drátu za studena. Jedná se technologii konvenčního tažení přes průvlakové rolky a technologii vlečného tažení přes průvlakové rolky. V teoretické části diplomové práce jsou popsány jednotlivé technologie tažení a v praktické části je pak uvedeno vyhodnocení výsledků, získaných provozováním obou technologií. Vyhodnocení probíhalo z technologicky ekonomického hlediska, kde byly posuzovány náklady na provoz technologie vlečného tažení a technologie konvenčního tažení, a z materiálového hlediska, kde byly hodnoceny výsledky pevnosti v tahu po posledním úběru a pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech a zhodnocení množství zbytkového maziva po jednotlivých úběrech. Posouzení vyhodnocených výsledků, jednotlivá doporučení a návrhy pro další testování a optimalizaci jsou popsány v závěru práce.

Klíčová slova: technologie vlečného tažení, průvlakové rolky, pevnost v tahu, zbytkové mazivo, nízkouhlíkový drát.

Abstract

Master thesis evaluates two different technologies of low carbon wire drawing. This thesis elaborates technology of wire drawing with dies and technology of wire drawing with rolls. Various technologies are described in the theoretical part and the practical part evaluates results obtained from operation of both technologies. The evaluation was carried out from viewpoint technological and economic terms, where were assessed conversion costs for technology of wire drawing with rolls and technology of wire drawing with dies and from the viewpoint of the material properties, where were evaluated results of the tensile strength after the last pass and tensile strength after each pass and amount of the residual lubricant after each pass. Assessment of the evaluated results, individual recommendations and suggestions for further testing and optimization are discussed in the conclusion.

Keywords: technology of wire drawing with rolls, die rolls, tensile strength, residual lubricant, low carbon wire.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	TEORIE TAŽENÍ DRÁTŮ ZA STUDENA.....	2
2.1	<i>Základní poznatky z teorie tažení.....</i>	<i>2</i>
2.2	<i>Rozložení napětí v průvlaku</i>	<i>4</i>
2.3	<i>Deformace v průvlaku</i>	<i>5</i>
2.4	<i>Analýza napjatosti v průvlaku</i>	<i>7</i>
2.5	<i>Důsledky napjatosti v deformačním pásmu z technologického hlediska</i>	<i>8</i>
3	TAŽNÁ SÍLA.....	10
3.1	<i>Výpočet tažných sil.....</i>	<i>10</i>
3.2	<i>Geometrie průvlaku – teorie tažení pomocí horní, či dolní meze</i>	<i>13</i>
3.3	<i>Optimální úhel tažné části 2α a parametr Δ</i>	<i>15</i>
4	ZAŘÍZENÍ PRO TAŽENÍ.....	18
4.1	<i>Průvlak</i>	<i>18</i>
4.1.1	<i>Průvlaky ze slinutých karbidů - TKP</i>	<i>20</i>
4.1.2	<i>Průvlaky diamantové - MCD, PCD.....</i>	<i>20</i>
5	VLEČNÉ TAŽENÍ DRÁTU ZA STUDENA.....	21
5.1	<i>Princip vlečného tažení drátu.....</i>	<i>21</i>
5.1.1	<i>Technologie 2+2</i>	<i>21</i>
5.1.2	<i>Technologie 3+3</i>	<i>23</i>
5.2	<i>Popis zařízení pro vlečné tažení</i>	<i>25</i>
6	CÍL EXPERIMENTU.....	27
6.1	<i>Popis experimentu.....</i>	<i>27</i>
6.2	<i>Stroj A - standardní technologie tažení.....</i>	<i>28</i>
6.3	<i>Stroj B - kombinace dvou technologií tažení.....</i>	<i>29</i>
7	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	32
7.1	<i>Analýza výsledků z ekonomického hlediska</i>	<i>32</i>
7.1.1	<i>Opotřebení průvlaků</i>	<i>32</i>
7.1.1.1	<i>Dílčí závěr</i>	<i>35</i>
7.1.2	<i>Srovnání nákladů technologie vlečného tažení a standardní technologie tažení drátu za studena</i>	<i>36</i>
7.1.2.1	<i>Dílčí závěr</i>	<i>40</i>
7.1.3	<i>Spotřeba maziva</i>	<i>41</i>
7.1.3.1	<i>Dílčí závěr</i>	<i>42</i>
7.2	<i>Analýza výsledků z mechanického hlediska</i>	<i>43</i>
7.2.1	<i>Zbytkové mazivo</i>	<i>43</i>
7.2.1.1	<i>Dílčí závěr</i>	<i>47</i>

7.2.2	Pevnost v tahu po posledním úběru.....	47
7.2.2.1	Dílčí závěr.....	49
7.2.3	Pevnost v tahu po jednotlivých úběrech	49
7.2.3.1	Dílčí závěr.....	50
7.2.4	Mikrostruktura drátu.....	51
7.2.4.1	Dílčí závěr.....	52
8	ZÁVĚR.....	54
9	LITERATURA	56

1 ÚVOD

Výrobky z taženého ocelového drátu, jakožto i samotný ocelový drát se v dnešní době využívají pomalu ve všech průmyslových odvětvích. Tato skutečnost nám ukazuje, jak široké je uplatnění ocelových drátů a jejich výrobků. Mezi hlavní odběratele můžeme zařadit tato průmyslová odvětví: automobilový průmysl (ocelové kordy do pneumatik, hadicové dráty, táhla, pružiny a další), stavební průmysl (dráty, které jsou nezbytnou součástí v předepjatém betonu), strojírenský průmysl (šrouby, nýty, matice a další spojovací, či jiný materiál), dále také zemědělský průmysl (hlavně pletivo na drátěné ploty, dále síta, tkaniny a také chmelnicový vázací drát) a energetika (vodiče pro vedení el. energie). Drát bezpochyby znali již naši předkové. Ve 12. století byla v Theophilově spisu „*De Diversis Artibus*“ historicky první textová zmínka o tažení drátu. Šlo o tažení drátu přes tažné železo, přičemž tažná železa se pro tažení drátu používala až do 30. let 20. století. Ačkoli byla vysoká tvrdost karbidu wolframu stanovena již v roce 1896, používání průvlaků ze slinutých karbidů pro tažení drátu bylo rozšířeno až v roce 1925.

V důsledku velké konkurence v oboru tažení drátu se dnes kladou vysoké nároky na jakost a samozřejmě se pohlíží také na cenu taženého drátu. Nemalá pozornost se věnuje rozvoji tažirenských technologií a procesu tažení. Dnes již sice známe nové progresivní metody pro výrobu drátu, jako je např. tažení ultrazvukem, nebo výroba drátu pomocí hydrostatického protlačování, ale vzhledem ke složitosti procesu a vysoké ceně, zůstává tažení drátu přes průvlak standardním technologickým procesem pro výrobu ocelového taženého drátu. V procesu výroby ocelového drátu se také začíná objevovat technologie vlečného tažení drátu za studena pomocí průvlakových rolek.

Teoretická část mé práce popisuje proces tažení drátu přes průvlak a technologii vlečného tažení drátu pomocí průvlakových rolek za studena.

V experimentální části posuzuji dvě výše zmíněné technologie výroby drátu za studena a to technologii tažení drátu přes průvlak a technologii vlečného tažení drátu pomocí rolek a vyhodnocuji vybrané vlastnosti drátu vyrobeného těmito technologiemi [1, 2].

2 TEORIE TAŽENÍ DRÁTŮ ZA STUDENA

Vstupním polotovarem pro výrobu taženého ocelového drátu je válcovaný drát různých jakostí. Tažením takového válcovaného drátu za studena dochází k výrobě taženého drátu. Válcovaný drát je možno popsat jako vývalek o průměru nad 5 mm, který se dodává svinutý do svitku o hmotnosti až 3000 kg.

Na celkový proces výroby taženého drátu má vliv hlavně: kvalita válcovaného drátu, technický stav technologického zařízení, proces výroby a dílčí technologické operace, tvorba optimálních podmínek pro ideální kontrolu a řízení technologie výroby a v neposlední řadě také obsluha stroje. Celkový proces výroby taženého drátu čítá několik technologických operací, z nichž nejhlavnější jsou odstranění okují a úprava povrchu drátu, samotný proces tažení drátu a následovat může tepelné zpracování a pokovování, či potažení drátu jiným požadovaným materiálem.

Jak válcovaný, tak i tažený ocelový drát můžeme z výrobního hlediska rozdělit do tří skupin, a to na nízko-uhlíkový drát (obsah C < 0,25 %), středně, nebo vysoko-uhlíkový drát (obsah C 0,25 % až 1,0 %) a drát z ušlechtilých ocelí. Tažením vyrobený drát má velkou rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu [3].

2.1 Základní poznatky z teorie tažení

Principem tažení je protahování drátu převážně kruhového průřezu kuželovým otvorem v průvlaku, kde dochází k plastické deformaci. Zmenšuje se příčný průřez a prodlužuje se délka drátu. Také dochází ke změně mechanických vlastností. Materiál se zpevňuje a plasticita se postupně vyčerpává. Zpevnění, které při tažení vzniká, je způsobeno protahováním zrn ve směru tažení za vzniku vláknité struktury, kdy ve struktuře dochází ke zvýšení hustoty mřížkových poruch - dislokací. Rozmezí teplot plastické deformace při tažení za studena je takové, že zpevnění materiálu zůstane po deformaci zachováno. Jelikož se při tažení postupně zmenšuje příčný průřez drátu a v souladu s tím se prodlužuje délka, musí docházet ke zvyšování rychlosti tažení, a to ve směru postupu tažení pro každý následný úběr. Aby v průběhu tažení nedocházelo k přetrhům drátu, je nutno dodržovat zákon zachování objemu drátu při průchodu průvlakem za časovou jednotku:

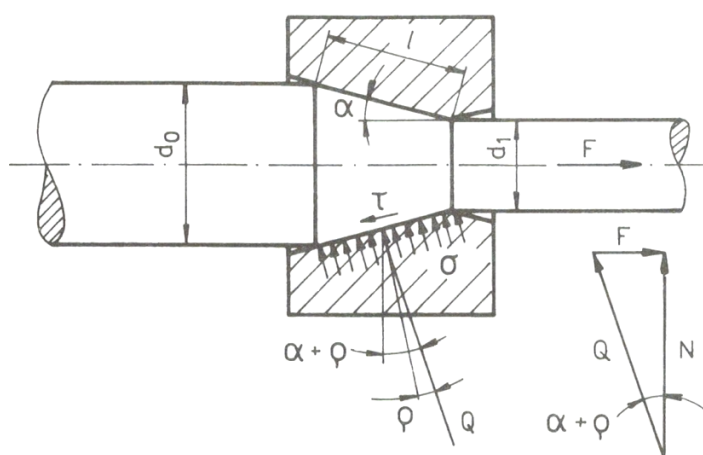
$$S_0 \cdot l_0 = S_1 \cdot l_1 = S_2 \cdot l_2 = \dots = S_n \cdot l_n , \quad (1)$$

a také,

$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \dots = S_n \cdot v_n, \quad (2)$$

kde: $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ - průřezy drátu,
 $l_0, l_1, l_2, \dots, l_n$ - délky drátu,
 $v_0, v_1, v_2, \dots, v_n$ - rychlosti drátu.

V průběhu tažení dochází k plastické deformaci drátu jen v kuželovité části průvlaku se vstupním úhlem 2α . **obr. 1.**



Obr. 1. Průvlak – rozložení sil [3]

V oblasti pásma deformace působí na povrchu průvlaku příčná síla Q . Tato síla je vyvolána působením vnější tahové síly F . Vlivem vstupního úhlu 2α a třením mezi pracovní částí průvlaku a povrchem taženého materiálu působí již zmiňovaná příčná síla Q a to ve vztahu ke svislé složce síly N pod úhlem $\alpha + \rho$.

Na **obr. 1** můžeme vidět, že z trojúhelníku se dá vyvodit základní rovnice tahové síly F a příčné síly Q :

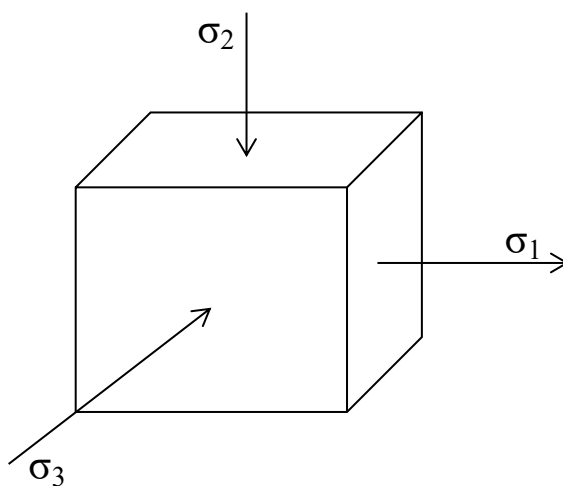
$$F = Q \cdot \sin(\alpha + \rho), \quad (3)$$

$$Q = F / \sin(\alpha + \rho). \quad (4)$$

Dosahuje-li koeficient tření $\mu = \tan \rho$ při efektivním mazání hodnoty pod 0,05 ($\rho < 3^\circ$) a předpokládáme-li, že vstupní úhel 2α je nejčastěji v rozmezí 10° až 20° , je velikost příčné síly Q 4 až 7 násobkem hodnoty síly tahové F [3, 4].

2.2 Rozložení napětí v průvlaku

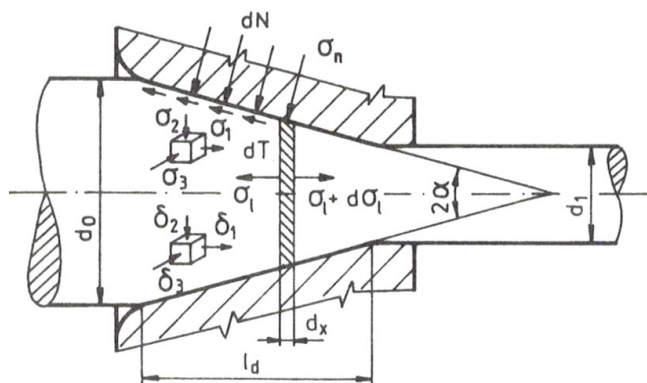
Termínem napětí se označuje intenzita vnitřních sil, které vznikají v taženém materiálu při procesu deformace vlivem působení vnějších sil: a) tažná síla stroje, b) tlak, jenž vzniká odporem průvlaku při tažení, c) síly vnějšího tření mezi styčnou plochou taženého materiálu a tažným nástrojem. Při tažení je vzhledem k potřebám výpočtu tažných sil a také pro správné navržení a průběžné hodnocení daného technologického postupu nutné znát stavy napjatosti v pásmu deformace průvlaku a jejich matematické rozbory. Tečné napětí vznikající v důsledku vnějšího tření a geometrický stav při deformaci jsou příčinou, že směry hlavních os napjatosti a geometrické osy pásma deformace se neshodují, čímž se matematické výpočty komplikují. Nejvhodnějším řešením je použít metodu skluzových linií. V pásmu deformace je při tažení v libovolném bodě vyvolán tříosý stav napjatosti (viz **obr. 2**) s tlakovým napětím v příčném směru, což umožňuje dostatečně velké deformace materiálu. U drátu s kruhovým průřezem se jedná o všestranně radiální tlak. Největší napětí, jež je vyvoláno účinkem tažné síly působící v podélném směru, je napětí tahové. Toto hlavní tahové napětí a také zpevňování materiálu při tažení za studena omezují velikost plastické deformace při průchodu průvlakem [6, 7].



Obr. 2. Hlavní napětí, tvořící tříosý stav napjatosti při tažení [7]

2.3 Deformace v průvlaku

Drát průměru d_0 vstupující do průvlaku se za působení tažné síly F deformuje za vzniku nového průměru d_1 , což je výsledný průměr drátu po tažení. V pásmu deformace působí na povrch taženého drátu normálové tlaky d_N a elementární třecí síly $d_T = \mu \cdot d_N$, které rozhodují o celkovém stavu napjatosti v deformačním pásmu. V kalibrační části průvlaku jsou tyto síly menší a deformaci v kuželovité části průvlaku neovlivňují. Normálové napětí σ_n a tečné napětí $\tau = \mu \cdot \sigma_n$, působí na povrch materiálu v pásmu deformace a to na jakoukoliv jeho příčnou část s nekonečně malým rozměrem d_x . Dále působí v pásmu deformace také podélné tahové napětí σ_l a $(\sigma_l + d\sigma_l)$, které působí v příčných průřezech a jeho rozložení není rovnoměrné. Vliv výše zmíněných veličin na materiál v pásmu deformace průvlaku vidíme na **obr. 3**.



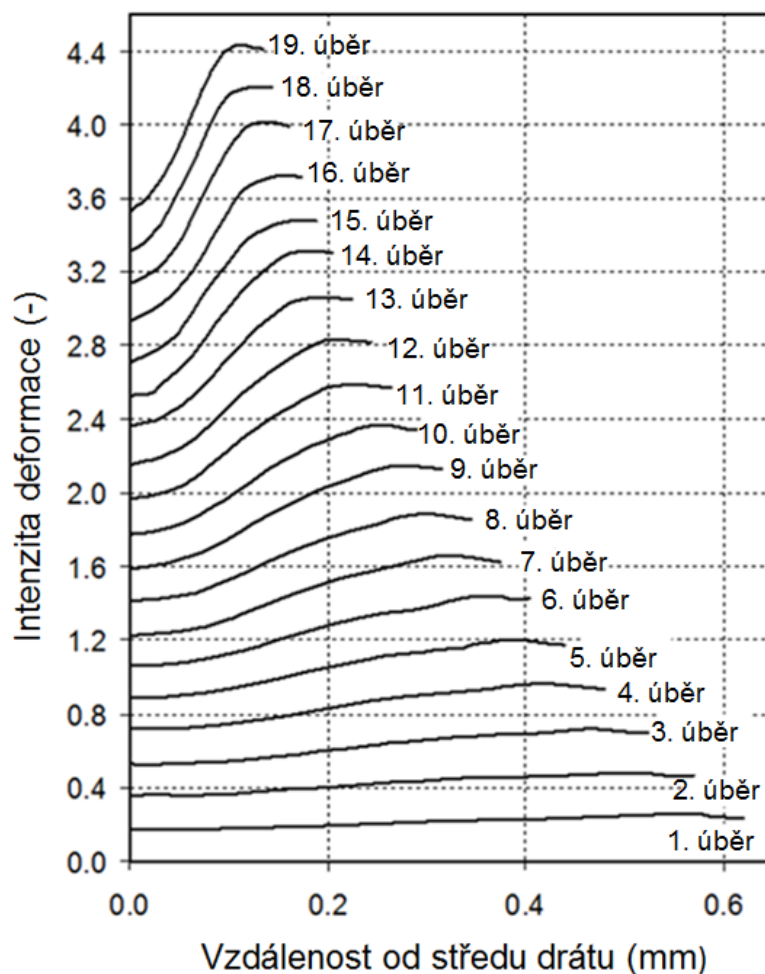
Obr. 3. Základní princip tažení v průvlaku [3]

Hlavní napětí (viz **obr. 2**), která tvoří tříosý stav napjatosti v libovolném bodě pásma deformace průvlaku, jsou:

- největší napětí σ_1 , které je tahové a působí ve směru podélném,
- střední napětí σ_2 , které je tlakové a působí ve směru radiálním,
- nejmenší napětí σ_3 , které je také tlakové a působí ve směru obvodovém [3].

V procesu tažení drátu dochází kromě lineární deformace také ke smykové deformaci v materiálu. Smyková deformace v materiálu přispívá k celkové plastické deformaci, ale ne ke snížení průměru drátu. Proto je někdy označována jako nehomogenní deformace [8]. Zvyšující se hodnotu smykové deformace můžeme vidět na **obr. 4**, kde autor posuzoval

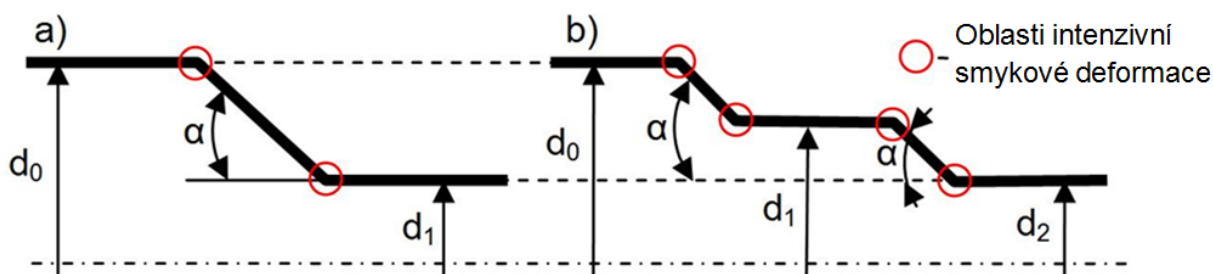
rozložení intenzity smykové deformace po průřezu materiálu pro tažení přes úběrovou řadu s devatenácti úběry a koeficientem tření $\mu = 0,03$.



Obr. 4. *Intenzita smykové deformace po průřezu drátu [19]*

Z **obr. 4** je patrné, že rozdíl intenzity smykové deformace mezi povrchem a středem drátu roste s přibývajícími úběry. Na povrchu materiálu je již intenzita smykové deformace dosti vysoká, což může vést ke vzniku mikrotrhliny, která může znamenat lom. Následkem velké smykové deformace dochází ke snížení houževnatosti materiálu.

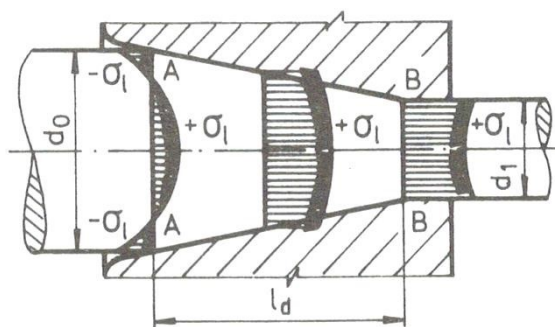
Dalším z důsledků tažení drátu s použitím úběrové řady, která čítá více úběrů, než řady s menším počtem úběrů (pro tažení drátu se stejným finálním průměrem) je, že v důsledku větší smykové deformace dochází k většímu zpevnění. Celková deformace Q_c bude pro obě řady konstantní, ale dílčí úběry Q_d budou rozdílné. Hmotný bod ležící v blízkosti povrchu drátu projde při tažení s menším počtem tahů méněkrát místy, kde dochází k výrazné změně trajektorie toku materiálu a ke zvyšování smykové deformace (viz **obr. 5**) [19].



Obr. 5. Trajektorie hmotného bodu, $Q_c = \text{konstantní}$, a) 1 úběr, b) 2 úběry [19]

2.4 Analýza napjatosti v průvlaku

Složité průběh deformace v rozsahu tvářeného materiálu v pásnu deformace přímo souvisí s rozložením napětí v dílčích oblastech tohoto rozsahu. Podélná napětí σ_l mají v jednotlivých příčných průřezích různou velikost a jejich profil se obměňuje v průběhu od vstupu do pásma deformace, až po jeho výstup (viz **obr. 6**).

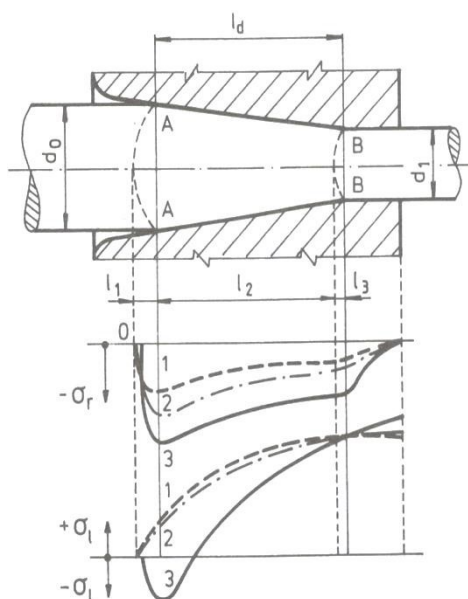


Obr. 6. Měnící se podélná napětí v příčných řezech od vstupu po výstup pásma deformace [3]

Při vstupu do pásma deformace můžeme ještě očekávat působení napětí σ_l s homogenním stavem napjatosti. Jedná se oblast vznikající pružné deformace. V oblasti vznikající plastické deformace působí na povrchové vrstvy materiálu tlaková napětí $-\sigma_l$, která jsou vyvolána brzdícím účinkem vnějšího tření. Tato tlaková napětí mohou dokonce způsobit napěchování materiálu. Naopak na vrstvy uprostřed materiálu již působí tahová napětí $+\sigma_l$. Uprostřed pásma deformace, v kterémkoli příčném průřezu působí jen podélná tahová napětí $+\sigma_l$. Největších hodnot dosahují v osové paprsku. Na konci pásma deformace působí rovněž jen podélná tahová napětí $+\sigma_l$, ale nejvyšších hodnot dosahují naopak v povrchových vrstvách.

Průběh podélných a radiálních napětí v pásnu deformace rozděleném na úseky l_1 , l_2 a l_3 můžeme vidět na **obr. 7**. Jsou zde vidět tři křivky podélného napětí $+\sigma_l$, $-\sigma_l$ a tři křivky radiálního napětí σ_r . Křivka 1 nám popisuje napětí v osové vláknu. Křivka 2 popisuje

průběh napětí v mezilehlém vláknu a křivka 3 popisuje napětí v povrchovém vláknu taženého drátu [3]. Radiální tlaková napětí jsou nejmenší v ose materiálu a rostou směrem ke styčnému povrchu taženého drátu, kde dosahují největších hodnot. V podélném směru jsou radiální napětí největší na začátku deformačního pásma a klesají směrem k oblasti výstupu. Tahová podélná napětí se zvyšují, jak už bylo naznačeno směrem k výstupní rovině. Průběh podélných napětí, jež mají nejvyšší hodnoty ve středových oblastech, může dokonce zapříčinit vznik trhlin ve středových vláknech materiálu při tažení. Rychlost prodlužování středových vláken při tažení je totiž větší než u vláken povrchových [9].



Obr. 7. *Pásmo deformace – podélná a radiální napětí [3]*

2.5 Důsledky napjatosti v deformačním pásmu z technologického hlediska

Podmínku plasticity, jež je potřebná pro technologický proces tažení, lze ve zjednodušené formě matematicky formulovat na základě hypotézy největších smykových napětí:

$$\sigma_l - \sigma_r = R_e . \quad (5)$$

Podmínka platí v rozsahu všech bodů deformačního pásma, což u materiálu kruhového průřezu znamená pro všechny body plochy mezi průřezy A-A a B-B (viz **obr. 7**). R_e je okamžitá mez kluzu tvářeného materiálu, která představuje okamžitý deformační odpor σ_d daného tvářeného materiálu. Podmínice musí být vyhověno v každém okamžiku a to v celém tvářeném objemu. Obě napětí σ_l a σ_r musí být do rovnice dosazovány i s ohledem na znaménka. Podmínku plasticity je potom nutno psát v tomto tvaru:

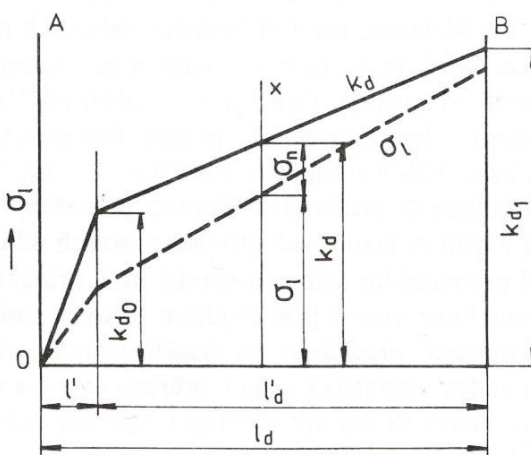
$$\pm\sigma_l + \sigma_r = R_e . \quad (6)$$

Napětí σ_r bude dosazováno jak pro povrchové vrstvy, tak i pro vrstvy osově, a to po celé délce pásma deformace. Naopak napětí σ_l bude nutné u povrchových vrstev začátku deformačního pásma dosazovat ve formě $-\sigma_l$ a až v následující části tohoto pásma ve formě $+\sigma_l$. Z toho vyplývá, že podmínku plasticity a tím pádem veškerý technologický proces tažení v průvlaku, ovlivňuje průběh podélných napětí.

Součet napětí σ_l a σ_r je dle rovnic (5) a (6) konstantní a je roven okamžité mezi kluzu R_e . Jelikož je podmínka plasticity dána pro celý stav stabilní deformace, platí $\sigma_d = R_e$ až $\sigma_d = R_m$. R_m se rovná skutečné mezi pevnosti. V reálném procesu tažení roste deformační odpor materiálu se stupněm deformace exponenciálně, což je dáno vztahem:

$$S_\sigma = k \cdot S_\varepsilon^n , \quad (7)$$

kde S_σ je intenzita napětí, S_ε je intenzita deformace, k je materiálová konstanta a n je koeficient zpevnění < 1 . Přijmeme-li ideální stav, kdy deformační odpor materiálu poroste se stupněm deformace lineárně, dosáhneme největšího zpevnění materiálu, tedy $n = 1$. Tuto změnu deformačního odporu v deformačním pásmu můžeme vidět na **obr. 8**, kde nám ji představuje čára $k_d = \sigma_d$.



Obr. 8. Změna deformačního odporu v deformačním pásmu [6]

Dále je zde vyobrazen ideální průběh napětí $+\sigma_l$. Rozdíl čar k_d a σ_l nám udává v jakémkoli příčném průřezu žádoucí radiální napětí potřebné ke splnění podmínky plasticity se stabilním růstem deformace. V praxi může nastat případ, že hodnota napětí $+\sigma_l$ bude

tak vysoká, že bude rovna deformačnímu odporu σ_d na mezi pevnosti R_m , popřípadě i vyšší. Jelikož $-\sigma_r$ je jen a pouze tlakové napětí, dojde k porušení soudržnosti drátu v příčném průřezu. K porušení může ovšem dojít pouze v osových vrstvách a to dosáhne-li tahové napětí stavu $+\sigma_l \geq R_m$ a dojde tak k vytvoření podmínek nestabilní deformace. Obdobné šíření trhliny od osy směrem ke vnějším vrstvám se tvoří při vzniku krčku u tahové zkoušky. U tažené tyče může dojít k jevu, který je známý jako přetažení materiálu, což znamená, že tlakové radiální napětí zastaví šíření trhliny v osových vrstvách [6, 11].

3 TAŽNÁ SÍLA

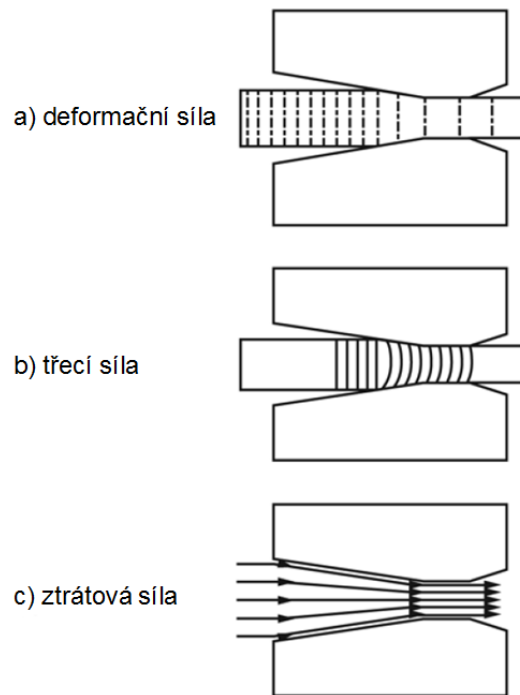
V odborné literatuře je popsáno téměř 30 různých způsobů výpočtu tažné síly. Veškeré tyto výpočty je možno rozdělit do čtyř skupin:

- klasická teorie tažení,
- teorie tažení, jež využívá metody horní, či dolní meze,
- hydrodynamické teorie tažení,
- optimální vstupní úhel 2α .

Výpočty tažné síly vychází většinou ze zjednodušených předpokladů. Hlavně se uvažují průměrné velikosti radiálních a podélných napětí, čímž je dáno jejich rovnoměrné rozložení v deformačním pásmu. Dále se uvažuje, že koeficient vnějšího tření má stálou hodnotu a často bývá střední hodnota meze kluzu nahrazována střední hodnotou meze pevnosti. Následkem zpevnění není totiž mezi těmito dvěma hodnotami velký rozdíl. Kalibrační část se zpravidla nehodnotí, tok materiálu se posuzuje pouze v konické části průvlaku [6].

3.1 Výpočet tažných sil

V klasických teoriích tažení se napětí a tažná síla počítají z podmínek plasticity a z diferenciálních rovnic rovnováhy napětí v bodě tvářeného objemu. Obecně jsou ovšem tyto rovnice neřešitelné, a proto se pro řešení užívá spousta jednodušších předpokladů. Ty však potom mají vliv na přesnost výsledků. Kupříkladu můžeme zhlédnout vzorce dle autorů Pomp – Siebel – Houdremont. Celková tažná síla F_c je brána jako součet tří jednotlivých sil ovlivňujících proces tažení **obr. 9**.



Obr. 9. Zobrazení deformační, třecí a ztrátové síly při tažení [13]

Jedná se o sílu deformační F_{def} nutnou pro deformaci taženého materiálu, dále síly třecí $F_{tř}$ nezbytné pro překonání vnějšího tření a síly ztrátové F_{vz} potřebné pro překonání vnitřních ztrát.

$$F_c = F_{def} + F_{tř} + F_{vz} , \quad (8)$$

$$F_{def} = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} , \quad (9)$$

$$F_{tř} = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \cdot \frac{\mu}{\alpha} , \quad (10)$$

$$F_{vz} = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \frac{2}{3} \cdot \alpha , \quad (11)$$

$$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3 \ln \frac{S_0}{S_1}} \right) , \quad (12)$$

kde: S_0 a S_1 - vstupní a výstupní průřezy průměru drátu,
 R_{ms} - střední mez pevnosti drátu,
 S_0/S_1 - součinitel prodloužení,

- μ - koeficient tření,
 α - polovina tažného úhlu průvlaku [11].

Některé další vzorce pro výpočet tažné síly drátu kruhového průřezu vidíme v **tab. 1**.

Tab. 1. *Výpočet tažných sil drátů kruhového průřezu dle různých autorů [5]*

Autor	Vzorec	Jednotka
Körber - Eichinger	$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \left\{ \left(1 + \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \frac{4\alpha}{3\sqrt{3}} \right\}$	(N)
Sachs	$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot ctg\alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\mu \cdot ctg\alpha} \right]$	(N)
Sachs doplněno Körber - Eichinger	$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot ctg\alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\mu \cdot ctg\alpha} \right] + 0,77\alpha \right\}$	(N)
Pöschl – Mac Lelan	$F_c = S_1 \cdot R_{ms} \cdot 0,99 \left[\left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{1,54} - 1 \right]$	(N)

Dle výše uvedené rovnice (9) není tažná síla F_{def} , jež je potřebná k deformaci materiálu závislá na velikosti úhlu 2α a je při všech velikostech tohoto úhlu stejná. Jelikož dochází se zvětšujícím se tažným úhlem 2α ke zmenšení stykové plochy mezi taženým materiálem a průvlakem, klesá síla $F_{tř}$ potřebná pro překonání tření. Naopak síla F_{vz} , nutná k překonání vnitřních ztrát, při zvyšujícím se tažném úhlu 2α roste. Síly $F_{tř}$ a F_{vz} jsou ztrátové síly. $F_{tř}$ jsou vnější ztrátové síly a F_{vz} jsou vnitřní ztrátové síly. Při obvyklých rychlostech a náležitém režimu mazání je podíl dílčích sil na celkové tažnou sílu F_c následující:

$$F_{def} = 68 \% , \quad F_{tř} = 20 \% , \quad F_{vz} = 12 \% .$$

Pomocí rovnice (13), vyjádříme účinnost přetváření γ při tažení, která je dána podílem síly potřebné k deformaci materiálu F_{def} a celkové tažné síly F_c .

$$\gamma = \frac{F_{def}}{F_c} \cdot 100 \quad (13)$$

Snahou je samozřejmě získat nejvyšší účinnost přetváření. Abychom ji dosáhli, musíme zvolit správnou velikost tažného úhlu 2α a to v závislosti na taženém materiálu, použitém mazivu a dílčí deformaci.

Žádný ze vzorců v **tab. 1** nepočítá s účinkem rychlosti tažení na tažnou sílu, nebo napětí. V klasických teoriích tažení je tažná síla hlavně funkcí těchto veličin:

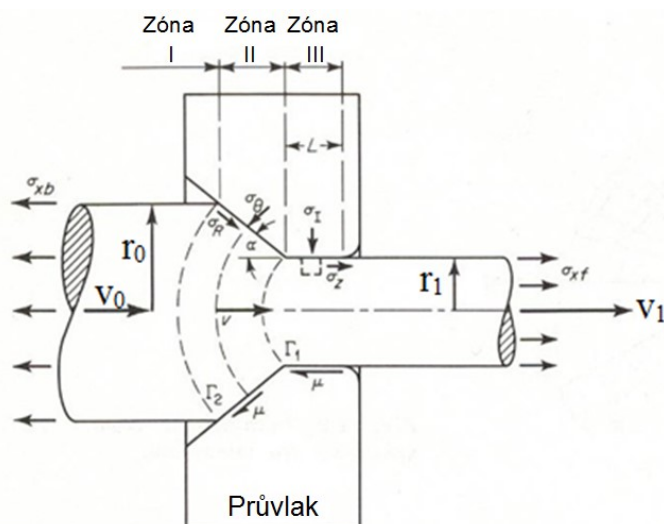
$$F = f(S_1, R_m, \varepsilon, \mu, 2\alpha) . \quad (14)$$

Tažná síla roste s růstem součinitele vnějšího tření μ , s růstem dílčí deformace ε , s růstem průřezu drátu S_1 a také s růstem pevnosti v tahu R_m taženého materiálu. Otázka vlivu velikosti vstupního úhlu 2α na tažnou sílu je popsána v dalších kapitolách [5].

3.2 Geometrie průvaku – teorie tažení pomocí horní, či dolní meze

V teorii tažení pomocí horní, či dolní meze je pro výpočet tažných sil také používáno přibližných hodnot a zjednodušujících předpokladů. Tento postup pro výpočet tažné síly využívá dvě přibližná řešení. První řešení je pomocí metody horní meze. Zde dojde k vypočítání hodnoty, která je větší nebo stejná jako hodnota skutečné tažné síly. Druhé řešení je pomocí metody dolní meze. Zde dojde k vypočítání hodnoty, která je rovna nebo menší než je hodnota skutečné tažné síly. Z toho vyplývá, že skutečná hodnota tažné síly je v rozmezí těchto dvou vypočtených hodnot. Jelikož se jedná o mezní výpočet, řešení je přibližné s možností odhadu maximální možné chyby [6].

Předpokladem výpočtů pomocí horní či dolní meze je, že průvlak je dokonale tuhé těleso s danou geometrií.



Obr. 10. Deformační pásmo v průvaku dle Avitzura [12]

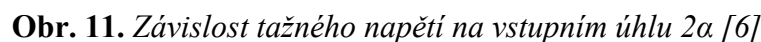
Na **obr. 10** můžeme vidět, že uvažované pásmo taženého drátu je rozděleno na tři zóny, ve kterých je rychlost deformace souvislá. V zóně I a v zóně III je rychlost toku kovu po průřezu rovnoměrná. V zóně I je rychlost v_0 a v zóně III je rychlost v_1 . Ze zákona zachování objemu vychází rovnice:

$$v_0 = v_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2. \quad (15)$$

Zóna I zahrnuje materiál vstupující do deformačního pásma, kde vlastní deformace ještě nezačala. Zóna I a zóna II jsou od sebe odděleny plochou Γ_2 , která má kulový tvar s poloměrem r_0 a středem ve vrcholu kužele průvlaku. Zóna II je úsek pásma deformace, kde probíhá vlastní deformace materiálu a je ohraničena plochou kuželovitého průvlaku se vstupním úhlem 2α a dvěma plochami Γ_1 a Γ_2 . Plocha Γ_1 kulového tvaru s poloměrem r_f a středem ve vrcholu kužele průvlaku odděluje deformační zónu II od zóny III, jež tvoří novou vznikající část drátu. V zóně III dochází k ukončení deformace a k vyrovnání rychlosti toku materiálu. Mezní plochy Γ_1 a Γ_2 jsou ovlivněny třemi parametry, kterými jsou tažný úhel, tření a dílčí úběry a mohou mít obecně různý tvar [12].

Uvažovaný typ deformace je založen na jednom ze stavů skutečného toku materiálu, jemuž je předpokládán typ toku podobný. Tok materiálu je ovšem ovlivněn různými činiteli, např. dílčími úběry, vstupním úhlem 2α , nebo vnějším třením. V rozsahu normálního toku materiálu je pro malé úhly 2α velká tažná síla, což je dáno vysokými ztrátami třením. Se zvětšujícím se vstupním úhlem 2α se ztráty třením zmenšují a tažná síla se zmenšuje až k hodnotě tzv. optimálního úhlu tažení α_{opt} (viz **obr. 11**):

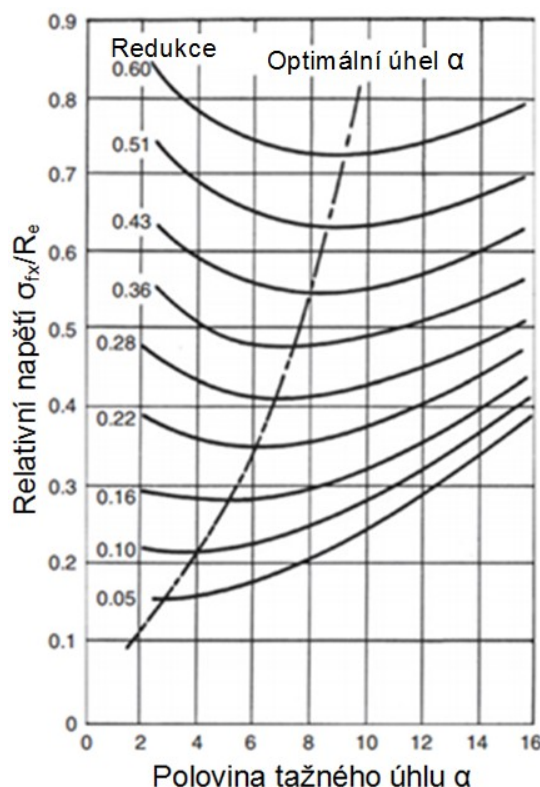
$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \mu \cdot \ln \frac{r_0}{r_1}}. \quad (16)$$


$$2\alpha_{cr1} \cong \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \ln \frac{r_0}{r_1}}. \quad (17)$$

3.3 Optimální úhel tažné části 2α a parametr Δ

15

získat vhodnou volbou vstupního úhlu 2α . Na **obr. 12** vidíme křivku optimálních úhlů α , která je funkcí různých redukcí a představuje minimální hodnoty relativního napětí pro danou redukci.



Obr. 12. Účinek úhlu α a redukce na relativní napětí [17]

Pásmo deformace má tvar lichoběžníku, který je za a) ohraničen vnitřními stěnami průvlaku a za b) kolmicemi k ose tažení, které představují první a poslední kontakt drátu s matricí v deformačním pásmu. Tvar pásma deformace charakterizuje parametr Δ , který se rovná podílu zprůměrované výšky pásma deformace kolmé k ose tažení a délky pásma deformace rovnoběžné s osou tažení. Přibližnou hodnotu parametru Δ můžeme určit z rovnice:

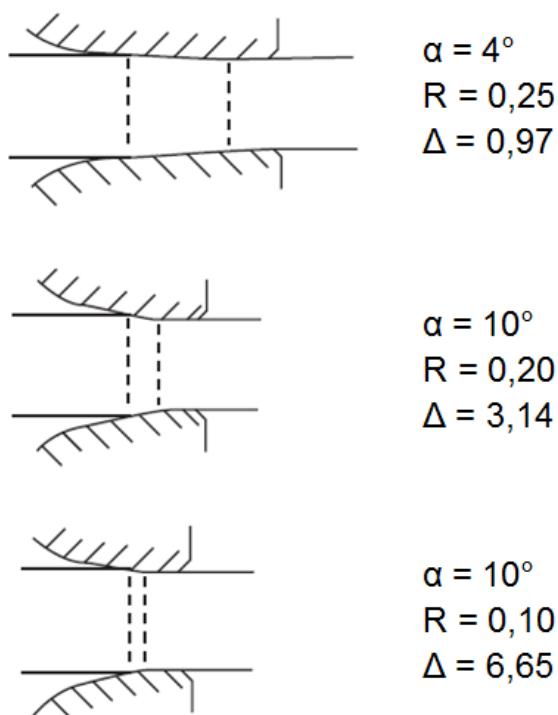
$$\Delta = \frac{\alpha}{R} \cdot \left(1 + (1 - R)^{\frac{1}{2}}\right)^2, \quad (18)$$

kde α je polovina tažného úhlu vyjádřena v radiánech a R je redukce vyjádřena jako $Q_d/100$, kde Q_d je dílčí úběr. J. G. Wistreich uvádí, že optimální hodnota parametru Δ by měla být menší než 1,25 (viz **tab. 2**).

Tab. 2. Hodnoty parametru Δ dle J. G. Wistreicha [8]

Δ parametr (-)						
Redukce (%)	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=6^\circ$	$\alpha=7^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=9^\circ$	$\alpha=10^\circ$
10	3,31	3,97	4,63	5,28	5,94	6,59
15	2,15	2,57	3,00	3,43	3,85	4,28
20	1,56	1,88	2,19	2,50	2,81	3,12
25	1,24	1,46	1,70	1,94	2,18	2,42
30	0,98	1,18	1,37	1,56	1,76	1,95
35	0,81	0,97	1,14	1,30	1,46	1,62
40	0,69	0,82	0,96	1,10	1,23	1,37
45	0,59	0,70	0,82	0,94	1,05	1,17

Nízká hodnota parametru Δ je zejména důležitá pro první úběry, protože hodnoty ztrátové práce jsou menší a snižuje se také míra zpevnění při tažení. Z toho důvodu je možno dosáhnout vyšších redukcí drátu mezi tepelnými zpracováními. Na **obr. 13** jsou vidět tři rozdílná pásma deformace s různými hodnotami parametru Δ v závislosti na velikosti úhlu α a redukci R [8, 17].

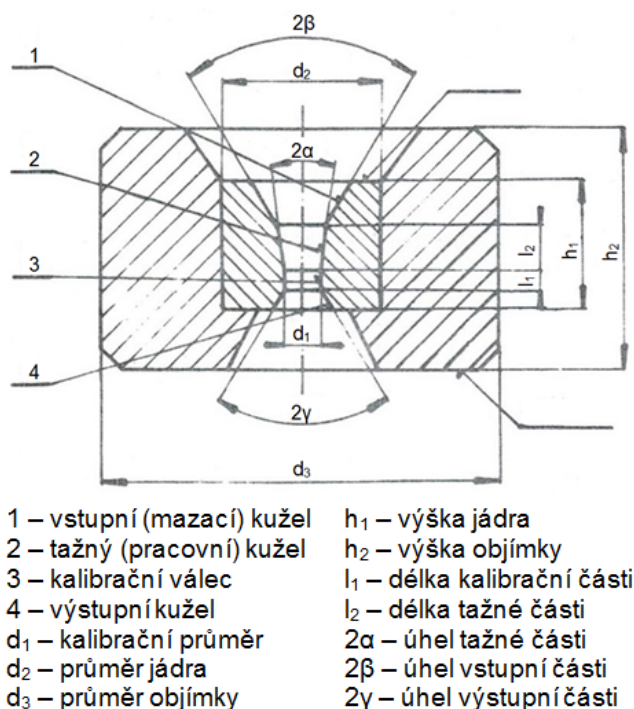


Obr. 13. Zobrazení tří odlišných pásem deformace [17]

4 ZAŘÍZENÍ PRO TAŽENÍ

4.1 Průvlak

Zásadním nástrojem užívaným pro tažení drátu je průvlak a skládá se ze dvou segmentů, objímky a jádra.



Obr. 14. Řez tažným průvlakem [14]

Na **obr. 14**, jež vyjadřuje řez tažným průvlakem, vidíme, že otvor v průvlakem se dělí na čtyři části.

První část představuje mazací kužel. Jeho hlavní úlohou je vpravit mazivo do pracovní (deformační) části. Velikost mazacího úhlu 2β závisí na způsobu mazání a typu taženého profilu. Při mazání tuhými mazivy je velikost úhlu 2β cca 40° až 60° . Dochází-li k mazání kapalnými mazivy, je velikost úhlu 2β v rozmezí 60° až 90° . Délka mazacího kužele by měla být taková, aby byly zajištěny řádné podmínky mazání. Obvykle bývá v rozsahu 2,5 mm až 7,0 mm.

Druhou část představuje pracovní část. Je to nejdůležitější část průvlakem, neboť zde dochází k plastické deformaci a tedy ke změně průměru taženého drátu. Velikost tažného úhlu 2α je

v závislosti s délkou pracovní části l_2 . Čím menší je úhel 2α , tím větší je délka l_2 , což je dáno vztahem:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d_0 - d_1}{2l_2}, \quad (19)$$

kde d_0 a d_1 jsou vstupní a výstupní průměry drátu a $\operatorname{tg} \alpha$ je tangenta úhlu pracovní části. Obecně platí zásada, že čím tvrdší je materiál, tím menší je tažný úhel, tudíž u vysokouhlíkových drátů je úhel α 4° až 6° a u nízkouhlíkových drátů je to 9° až 12° .

Další částí je kalibrační válec, ve kterém vzniká konečný tvar a požadovaný průměr taženého materiálu. Tato část je charakterizována délkou kalibračního válce l_1 a také průměrem d_1 . Pokud by byla délka l_1 příliš malá, došlo by k rychlému opotřebení kalibrační části, naopak při příliš velké hodnotě l_1 se zvyšuje tření a může dojít k zaostření taženého drátu. Obecně platí pravidlo, že čím menší je průměr d_1 , tím menší je hodnota délky l_1 a poměr l_1/d_1 roste. Pro průvlaky, kde se průměr kalibrační části d_1 pohybuje v rozmezí 0,5 mm až 14,0 mm, platí vztah:

$$\frac{l_1}{d_1} = (0,25 - 2,0), \quad (20)$$

kdy se nejvíce používají:

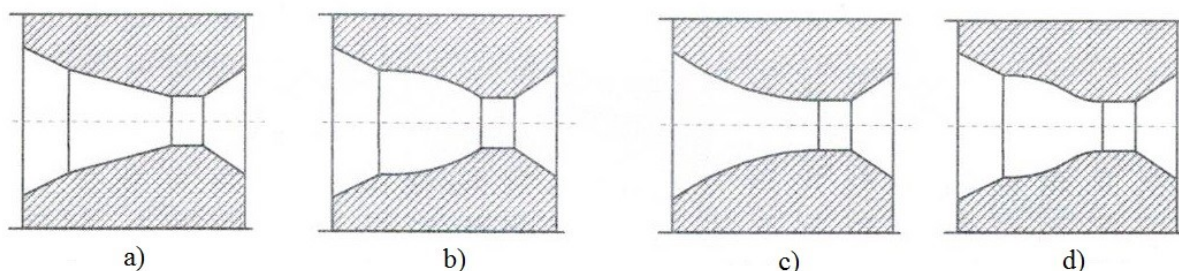
$$\frac{l_1}{d_1} = \frac{1}{4}; \frac{1}{3}; \frac{1}{2}; \frac{3}{4}; \frac{1}{1}; \frac{3}{2}; \frac{2}{1}. \quad (21)$$

Poslední, čtvrtou částí je výstupní kužel. Tato část nehraje v procesu tažení tak významnou roli jako předešlé části, ale jeho hlavním úkolem je zajistit ochranu kalibrační části. Výstupní úhel 2γ se pohybuje v hodnotách 20° , 30° , nebo 45° [15].

Pokud má průvlak neopracované plochy, nazýváme ho surový průvlak. Konstrukce průvlaků je ideální pro získání potřebných rozměrů, kvality povrchu, mechanických vlastností a struktury taženého materiálu. Obvykle se průvlaky rozdělují podle materiálu použitého k výrobě jádra:

- průvlaky tvrdokovové neboli průvlaky ze slinutých karbidů,
- průvlaky diamantové, a to buď z přírodních, nebo ze syntetických diamantů,
- průvlaky z dalších materiálů [14].

Dále se průvhlaky také dělí dle tvaru pracovní plochy na a) kuželovité (konické), b) vyduté, c) obloukové (radiální) a d) sigmoidální (viz **obr. 15**).



Obr. 15. Dělení průvhlaků dle tvaru pracovní plochy [16]

V dnešní době se ve výrobě nejvíce používají průvhlaky ze slinutých karbidů s konickým tvarem deformačního pásma. Pro tažení velmi malých průměrů se občas používá také průvhlaků s obloukovým deformačním pásmem. Další typy průvhlaků s deformačním pásmem vydutého, či sigmoidálního tvaru se používají jen velmi zřídka [16].

4.1.1 Průvhlaky ze slinutých karbidů - TKP

Jádra průvhlaků jsou většinou vyráběna metodou slinování a hlavními složkami jsou karbidy wolframu, karbidy titanu a pojivo, čímž je zpravidla kobalt. Karbidové složky poskytují jádru otěruvzdornost a tvrdost, zatím co pojící kov pevnost a houževnatost. Na výrobu objímk se používá uhlíková ocel, čítající pevnost velikosti 500 až 750 MPa. V poslední době dochází hlavně z důvodů vyšší životnosti průvhlaků k úpravě povrchu pomocí difuzních pochodů, a to především nanášením vrstev boru, nitridu titanu a také nanokrystalické kompozitní diamantové vrstvy.

4.1.2 Průvhlaky diamantové - MCD, PCD

MCD je monokrystalický přírodní diamant.

PCD je polykrystalický syntetický diamant.

Cena diamantových průvhlaků je výrazně vyšší než cena průvhlaků ze slinutých karbidů, a proto se užívají jen v určitých případech. Užívají se hlavně pro tažení menších průměrů, nebo pro tažení neželezných kovů. Drát tažený přes diamantový průvhlak má minimální ovalitu a výbornou jakost povrchu [11].

Porovnání vybraných vlastností materiálů užívaných pro výrobu průvlekových jader můžeme vidět v **tab. 3**.

Tab. 3. *Vybrané vlastnosti materiálů používaných pro výrobu jader průvleků [14]*

Vlastnosti	TKP 94 % karbidu wolframu + 6 % kobaltu	MCD	PCD	Jednotky
Modul pružnosti v tahu	630	964	841	(GPa)
Modul pružnosti ve smyku	250	220	345	(GPa)
Poissonova konstanta	0,21	0,20	0,32	(-)
Pevnost v tahu	1800	2600	1210	(MPa)
Pevnost v tlaku	4500	8680	7610	(MPa)

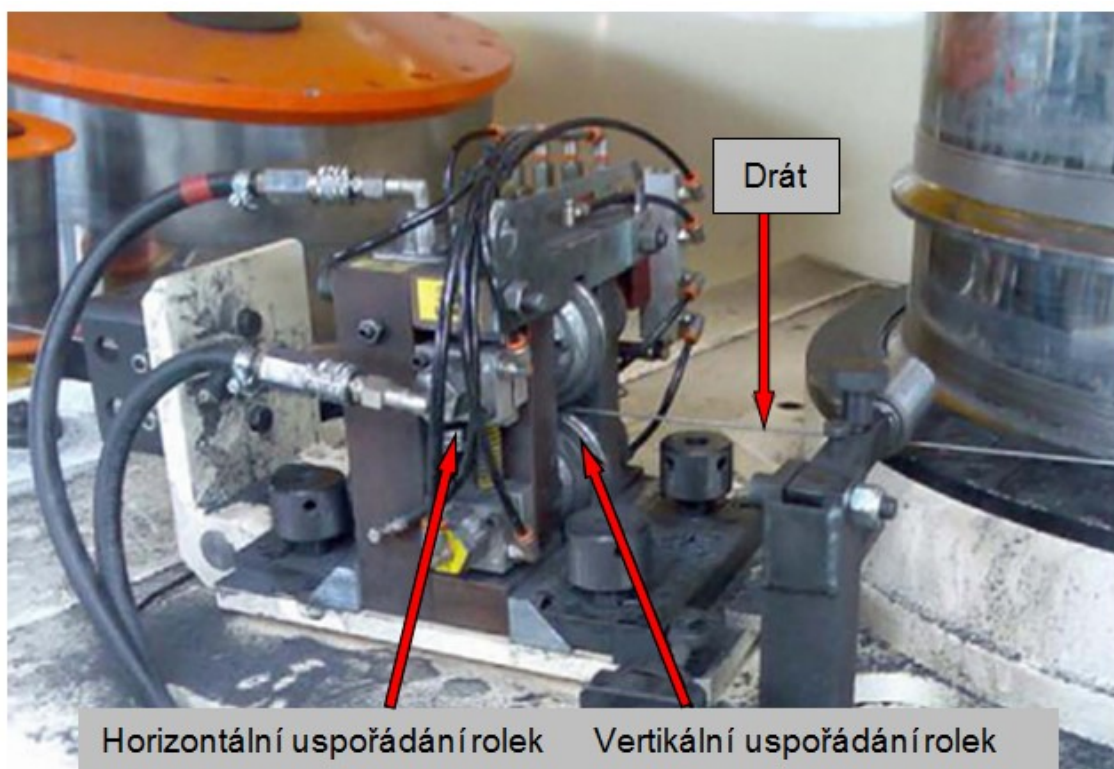
5 VLEČNÉ TAŽENÍ DRÁTU ZA STUDENA

Technologie vlečného tažení drátu pomocí rolek není v praxi příliš rozšířená. Hlavním důvodem je časově náročná výměna mikrokazet při změně průměru taženého drátu. Pokud by byl sortiment výroby příliš proměnlivý, muselo by se skladem držet velké množství mikrokazet určených pro jednotlivé tahy. Proto je tato technologie ideální pro stroje, kde se neustále táhne jeden průměr drátu.

5.1 Princip vlečného tažení drátu

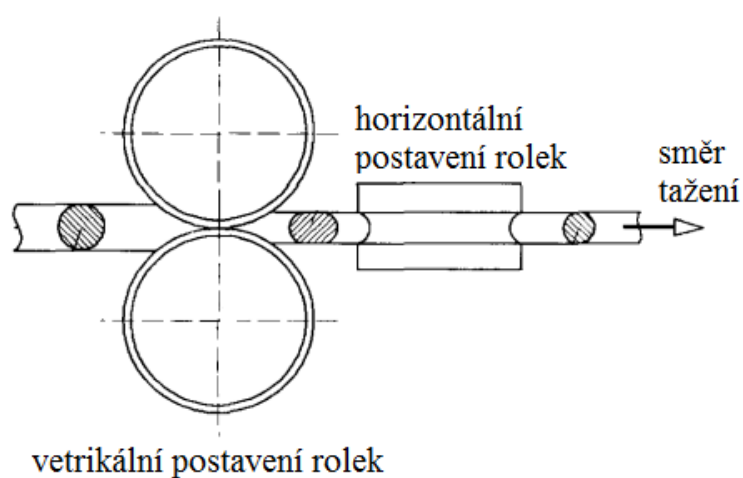
5.1.1 Technologie 2+2

Samotné zařízení, přes které probíhá redukce průměru drátu, se nazývá kazeta, nebo mikrokazeta pro vlečné tažení. Pro tažení průměrů od cca 0,7 mm do 3,1 mm se obvykle používají mikrokazety (viz **obr. 16**). Mikrokazety byly navrženy jako náhrada za tradiční průvlekky používané při víceúběrovém tažení kruhového drátu a to pro nízko, či vysokouhlíkovou ocel, legované a nerezové oceli, neželezné kovy, nebo svařovací drát. Použitím mikrokazet můžeme dosáhnout vyšších rychlosti tažení, úspory maziva a výrazného snížení prostojů díky extrémně dlouhé životnosti rolek [23, 24].



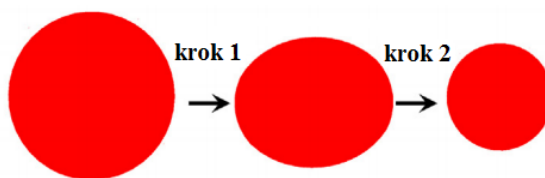
Obr. 16. Zařízení pro vlečné tažení drátu, technologie 2+2 [20]

Na zařízení (viz **obr. 16**) je použita technologie 2+2, což znamená, že drát prochází skrz dva páry nepoháněných průvlakových rolek. Nejprve vstupuje mezi rolky, které jsou umístěny v horizontálním uspořádání, a následně vstupuje mezi další rolky, které jsou umístěny ve vertikálním postavení. Pořadí postavení rolek může být i opačné, záleží na nastavené technologii (viz **obr. 17**).



Obr. 17. Uspořádání rolek v mikrokazetě [21]

Jednotlivý úběr zahrnuje dva kroky (meziúběry). Nejprve je drát deformován za vzniku oválného průřezu a následnou deformací vzniká opět kruhový průřez požadovaného průměru (viz **obr. 18**).



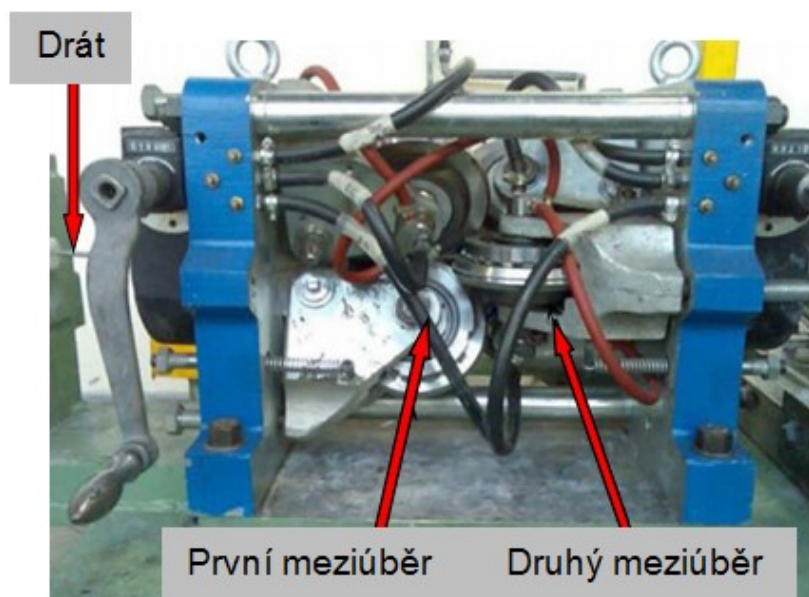
Obr. 18. *Průřezy drátu po jednotlivých krocích [20]*

Výhodou použití mikrokazet pro tažení je možnost zvýšení maximální redukce v průběhu jednoho úběru a také zvýšení rovnoměrnosti vlastností drátu. Při vlečném tažení, které probíhá přes nepoháněné rolky, dochází oproti konvenčnímu tažení ke snížení tření, protože součinitel tření závisí kromě na kontaktním tlaku také na rozdílu rychlostí obou těles. Síly potřebné pro tažení drátu poskytuje stejně jako u standardního tažení drátotah. Odlišné podmínky tření a deformace v deformačním pásmu rolek ovlivňují tvorbu textury (uspořádanosti) materiálu. Struktura vláken při použití technologie 2+2 u vlečného tažení je méně homogenní a textura je méně výrazná než při konvenčním tažení [21].

Při tažení pomocí technologie 2+2 dochází k odlišné deformaci než při konvenčním způsobu tažení. Je potřeba si uvědomit, že rolky mají v obvodové části vybroušenou drážku požadovaného rozměru a rádiusu. Postavení rolek je uspořádáno způsobem, že mezi rolkami je nastavena mezera velikosti cca 0,35 mm. Prochází-li tedy drát prvním meziúběrem, kdy jsou rolky v horizontálním uspořádání, dochází u drátu v oblasti, kde není v kontaktu s drážkou rolky, k bočnímu šíření, jež je způsobeno působením tlakové síly. Šíření si můžeme představit podobně jako vznik soudkovitosti při zkoušce tlakem. Boční deformace je ovlivněna rozměrem a tvarem drážky v rolce a vynaloženým napětím. Když materiál vstupuje do druhého meziúběru, kde jsou rolky uspořádány vertikálně, oblast drátu, kde došlo k šíření, vstupuje do kontaktu s pracovní plochou rolek, což vede k vysoké rychlosti deformace a k prudkému nárůstu kumulované plastické deformace [20].

5.1.2 Technologie 3+3

Další zařízení, které se zpravidla používá pro tažení drátu většího průměru (viz **obr. 19**) využívá technologii 3+3.



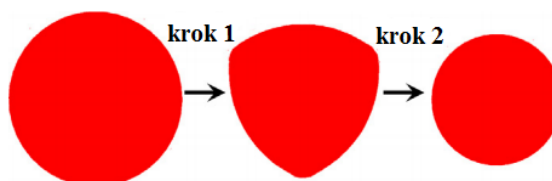
Obr. 19. *Zařízení pro vlečné tažení drátu, technologie 3+3 [20]*

Takové zařízení je osazeno šesti rolkami, kde je první meziúběr tvořen jednou trojicí rolek a druhý druhou trojicí rolek. Jednotlivá trojice rolek je postavena tak, aby rolky mezi sebou svíraly úhel 120° . Trojice rolek v druhém meziúběru je oproti trojici v prvním meziúběru ještě pootočena o 60° . Nejnovější zařízení tohoto typu již mají zabudovány samovystředovací a mazací systém, který snižuje počet operací potřebných k instalaci a nastavení rolek [20].

Zařízení využívající technologii 3+3 se používá k tažení drátu větších průměrů, nebo k tažení tyčí pro výztuž do betonu s žebrováním na povrchu a to o průměru až 16 mm. Je vhodné pro tažení nízko i vysokouhlíkové oceli, mědi, hliníku a drátu z titanu. Pro vznik žebrovaného povrchu jsou použity rolky s upravenou drážkou.

Podle tvaru a nastavení rolek je možno vyrábět dráty či tyče různých průřezů: kruhové, čtvercové, šestihranné, nebo již zmíněné s žebrováním na povrchu [22, 24].

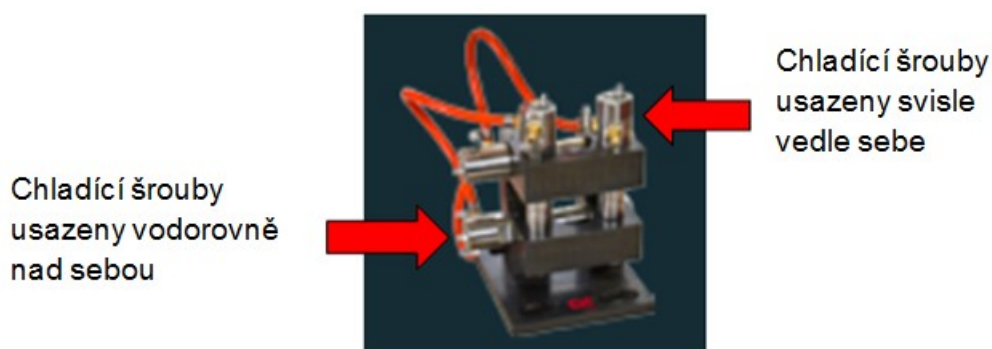
Průřez drátu po jednotlivých meziúběrech představuje **obr. 20**.



Obr. 20. *Průřezy drátu po jednotlivých krocích [20]*

5.2 Popis zařízení pro vlečné tažení

Zařízení pro vlečné tažení využívající technologii 2+2 se skládá z hlavního stojanu, který slouží pro uchycení čtyř chladících šroubů. Tyto šrouby jsou v hlavním stojanu uloženy v párech. Jedna dvojice je usazena svisle vedle sebe a umožňuje instalaci ložisek nesoucích průvlakové rolky v horizontálním uspořádání. Druhý pár chladících šroubů je usazen ve stojanu vodorovně nad sebou a umožňuje instalaci ložisek s rolkami ve vertikálním směru (viz **obr 21**). Otvory pro umístění všech čtyř chladících šroubů ve stojanu jsou uspořádány takovým způsobem, aby po seřízení celého zařízení nevybočoval drát z osy tažení. Hlavní stojan s chladícími šrouby je upevněn na základní desce a celé zařízení se instaluje do tažného stroje v prostoru mezi tažné bubny, kde se při konvenčním tažení nachází průvlaková skříň se zásobníkem maziva.



Obr. 21. Usazení chladících šroubů ve stojanu [24]

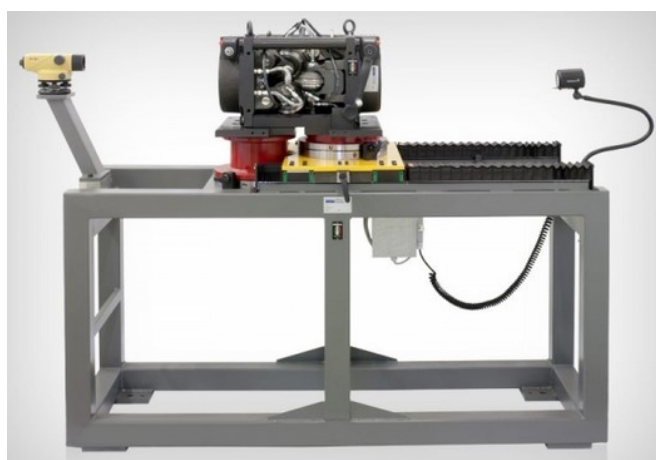
Každá průvlaková rolka je nasazena na válečkovém ložisku a zkompleťované ložisko s rolkou je umístěno na chladící šroub. U každého páru chladících šroubů je jeden šroub usazen ve stojanu v pevné poloze, zatímco druhý šroub je excentrický nastavitelný, což umožňuje jednak jednoduché vsunutí drátu mezi rolky a hlavně seřízení průvlakových rolek na požadovaný rozměr výstupního drátu. Při provozu tohoto zařízení dochází k zahřívání ložisek. Chladící voda, která koluje v centrálním chladícím okruhu, prochází přes chladící šrouby a tím umožňuje chlazení ložisek. Dále je nutné zabezpečit mazání ložisek, aby nedocházelo k jejich zadření. Tato operace může být zabezpečena např. napojením na mazací jednotku. Na **obr. 22** můžeme vidět příklad průvlakových rolek používaných pro vlečné tažení drátu za studena, jež jsou vyráběny z tvrdokovového materiálu.



Obr. 22. *Průvlakové rolky pro vlečné tažení*

Kromě vysoké životnosti průvlakových rolek je také výhodou možnost využití opotřebovaných rolek na osazení jiné mikrokazety připravované pro tažení většího průměru. Pokud je drážka v rolce opotřebovaná do takové míry, že zařízení již nejde seřídít pro tažení požadovaného průměru, můžeme drážku v rolce přebrousit na větší rozměr a opět použít pro tažení drátu většího průměru. Přebroušení se provádí na brousícím zařízení pomocí kalibračních jehel požadovaných rozměrů a pomocí brusné diamantové pasty.

Seřízení celého zařízení pro vlečné tažení se provádí na seřizovacím stole, který je zpravidla vybaven pojezdovou otočnou deskou, na kterou se mikrokazeta umístí. Dále je na jedné straně stolu umístěn světelný zdroj, který osvětluje pracovní prostor rolek, a na straně druhé je upevněno optické zařízení, které umožňuje kvalitnější pohled do pracovního prostoru rolek. Moderní seřizovací stůl můžeme vidět na **obr. 23** [22].



Obr. 23. *Stůl pro seřízení zařízení pro vlečné tažení [22]*

6 CÍL EXPERIMENTU

Praktická část této práce popisuje provozní experiment a jeho vyhodnocení. Experiment byl realizován za plného provozu ve firmě s dlouholetou praxí v oblasti tažení ocelového drátu různých výstupních průměrů.

Tato práce je postavena především na získání a vyhodnocení dat, jež by měly ukázat do jaké míry je z ekonomického hlediska výhodné používat technologii vlečného tažení drátu ve srovnání s klasickou technologií tažení přes průvlaky. Pro toto vyhodnocení se shromažďovaly výsledky ohledně spotřeby průvlaků při tažení a spotřeby maziva při tažení. Další zpracovaná a vyhodnocená data z oblasti mechanických vlastností taženého drátu, jako jsou pevnost finálního drátu a zpevňování drátu v průběhu tažení, by měly ukázat, do jaké míry ovlivňuje tažení drátu rozdílnými technologiemi požadovanou kvalitu vyráběného produktu.

Cílem práce je zhodnotit, je-li možno bez zhoršení kvality vyráběného materiálu a s předpokladem finanční úspory využít technologii vlečného tažení i na další úběry v úběrové řadě, popřípadě rozšířit užití této technologie i na další stroje v tažirenském provozu.

Celý experiment probíhal na dvou desetitažných drátotažných strojích stejného typu určených pro suchý tah, kde tažení na prvním stroji (dále jen stroj A) probíhalo standardní technologií tažení drátu přes průvlaky, a na druhém stroji (dále jen stroj B) se drát táhnul kombinací technologií tažení přes průvlaky a technologií 2+2 vlečného tažení drátu za studena pomocí průvlakových rolek.

6.1 Popis experimentu

Tažení drátu v rámci experimentu probíhalo v nepřetržitém provozu a samotný experiment trval 26 dní. Vyrobený drát byl standardně zpracován v následném výrobním procesu.

Za dobu trvání celého experimentu bylo vyrobeno téměř 600 tun taženého ocelového drátu, což při požadovaném finálním průměru 1,05 mm představuje 87 608 km nataženého drátu.

Vstupním polotovarem byl již předtažený drát o průměru 3,26 mm, který byl zpracován standardní technologií tažení v šesti úběrech. Vstupním materiálem pro tento předtah byl válcovaný drát o průměru 6,5 mm dodávaný z Třineckých železáren. Z chemického složení

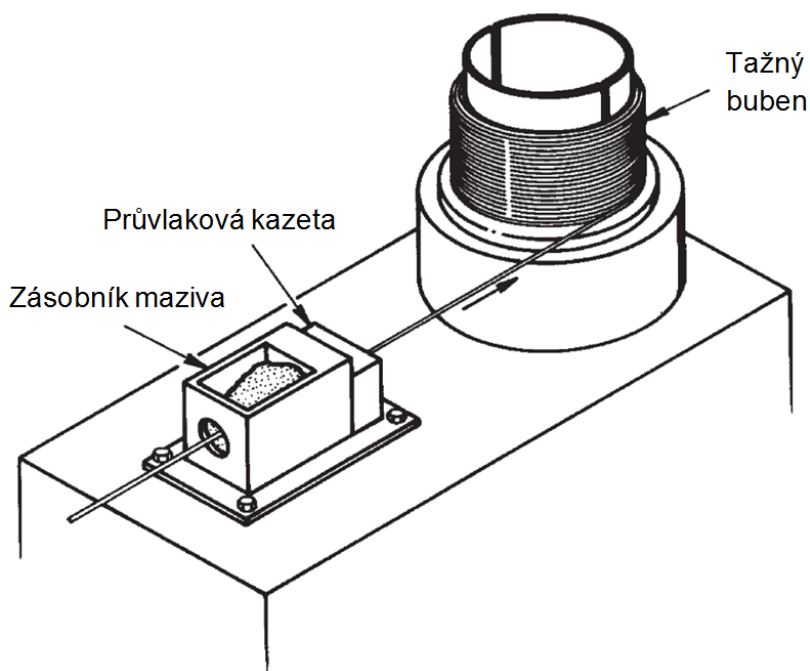
použitého válcovaného drátu (viz **tab. 4**) můžeme vypočítat, že se jedná o nízkouhlíkový drát.

Tab. 4. Chemické složení materiálu dodaného z Třineckých železáren

Chemické složení (%)									
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Mo
0,04	0,44	0,13	0,014	0,024	0,03	0,06	0,02	0,004	0,007

6.2 Stroj A - standardní technologie tažení

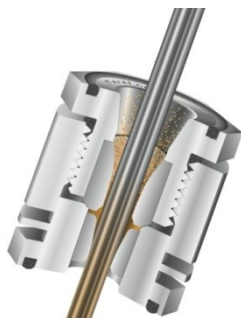
V průběhu experimentu bylo na tomto stroji nataženo 289,5 tun drátu. Stroj byl osazen úběrovou řadou, která čítá deset úběrů. Prvních osm úběrů bylo prováděno přes průvlaky ze slinutých karbidů, kde před každým úběrem drát procházel skrz zásobník maziva (viz **obr. 24**), kde došlo k náběru potřebného množství maziva.



Obr. 24. Zobrazení jednoho úběru při tažení [17]

Do všech osmi zásobníků maziva byl dodáván stejný typ sodného maziva v podobě prášku. Mazivo v zásobnících maziva je bez přestání promícháváno rotační vidlicí, aby byl drát s mazivem v neustálém kontaktu. Poslední dva úběry byly prováděny přes diamantové průvlaky bez podávání maziva. Důvodem bylo snížit množství zbytkového maziva na drátě,

což je vyžadováno při dalším užití nataženého drátu ve výrobním procesu. Poslední úběr je navíc ještě součástí centrálního oplachového okruhu, kdy je drát v průběhu tažení neustále oplachován proudem vody, což napomáhá dalšímu snížení množství zbytkového maziva na drátu. Oplachová voda proudí v průběhu tažení skrz nástroj, v němž je umístěn diamantový průvlak, funguje také jako chlazení. V průvlakových kazetách jsou u každého z prvních osmi úběrů, kromě tažných tvrdokovových průvlaků, také průvlakové tlakové. Sestavení průvlakové kazety je standardizováno a při kompletaci se používá příslušný tlakový průvlak, vymezovací podložka a příslušný tažný průvlak pro daný úběr. Otvor v tlakovém průvlaků musí být vždy o něco větší než je průměr drátu vstupujícího do průvlakové kazety, neboť v tlakovém průvlaků nedochází k deformaci materiálu, ale tento pouze napomáhá k vytvoření vysokého tlaku potřebného pro vznik kompaktního povlaku maziva na povrchu taženého drátu. Příklad komerčně vyráběné tlakové kazety je na **obr. 25**.



Obr. 25. *Schéma uložení tažného a tlakového průvlaků [18]*

Rychlost tažení byla v průběhu celého experimentu nastavena na 1500 metrů za minutu. Další parametry popisující úběrovou řadu budou popsány v další kapitole.

6.3 Stroj B - kombinace dvou technologií tažení

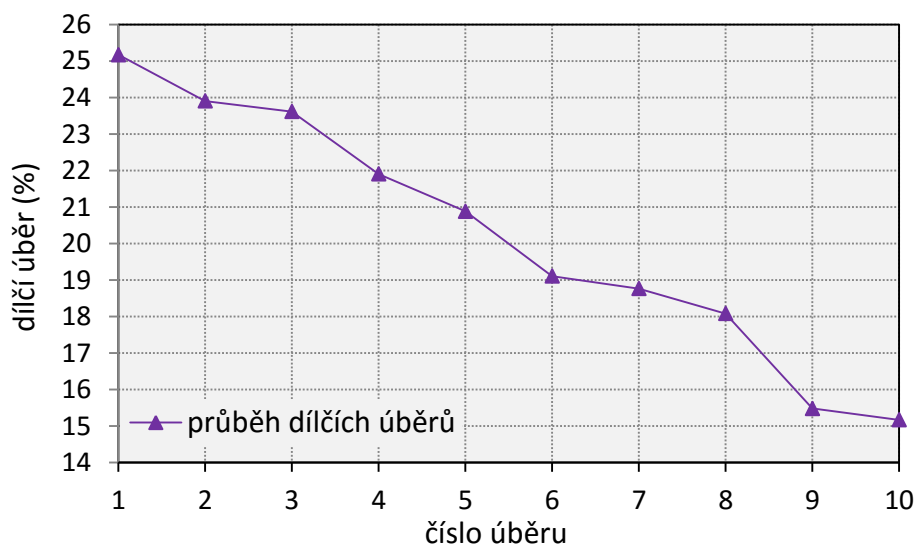
Na stroji B bylo v průběhu experimentu nataženo 306 tun drátu a tažený drát procházel také přes deset úběrů. Prvních pět úběrů bylo prováděno přes průvlakové ze slinutých karbidů a celý proces je stejný, jak u stroje A (viz předchozí kapitola). Pro další čtyři úběry nebyly použity průvlakové, ale drát byl tažen přes mikrokazety používající technologii vlečného tažení drátu v konfiguraci rolek 2+2. Před těmito úběry není dodáváno mazivo. Pro poslední úběr byl použit diamantový průvlak, který byl také součástí oplachového zařízení pro minimalizaci zbytkového maziva na výstupu. V **tab. 5** jsou základní technologické veličiny popisující úběrovou řadu stroje A a stroje B.

Tab. 5. Přehled základních technologických veličin úběrových řad strojů A a B

číslo úběru j	stroj A					stroj B				
	d_j (mm)	Q_{dj} (%)	2α (°)	Δ_j (-)	Q_c (%)	d_j (mm)	Q_{dj} (%)	2α (°)	Δ_j (-)	Q_c (%)
0	3,26				89,63	3,26				89,63
1	2,82	25,17	9	1,06		2,82	25,17	9	1,06	
2	2,46	23,90	9	1,12		2,46	23,90	9	1,12	
3	2,15	23,62	9	1,14		2,15	23,62	9	1,14	
4	1,90	21,90	9	1,24		1,90	21,90	9	1,24	
5	1,69	20,88	9	1,31		1,69	20,88	9	1,31	
6	1,52	19,11	9	1,44		1,52	19,11	-	1,62	
7	1,37	18,76	9	1,47		1,37	18,76	-	1,70	
8	1,24	18,08	9	1,54		1,24	18,08	-	1,75	
9	1,14	15,48	12	2,43		1,14	15,48	-	1,68	
10	1,05	15,17	12	2,48		1,05	15,17	12	2,48	

Q_c je celková deformace, Q_d je dílčí deformace, d je průměr drátu, 2α je vstupní úhel pásma deformace a Δ je parametr delta.

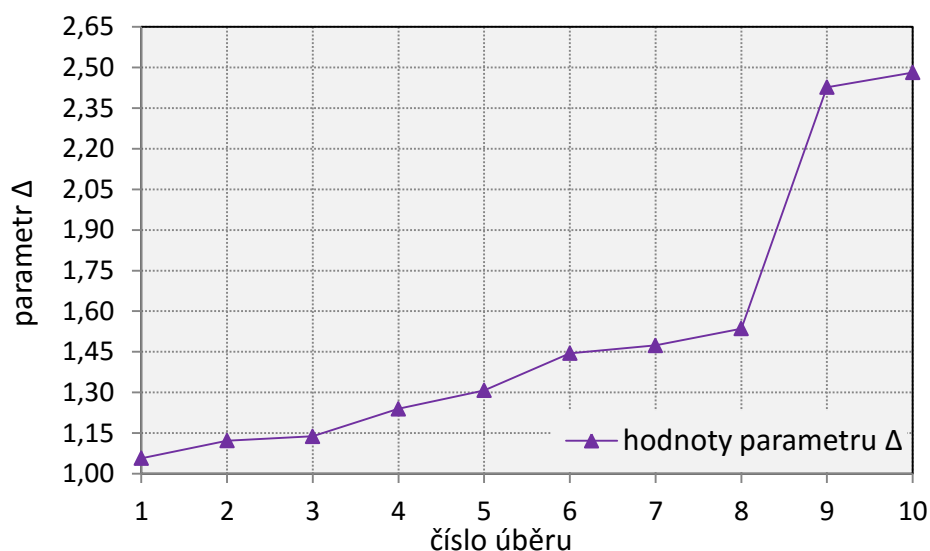
Jak je patrné z **tab. 5**, úběrová řada je pro oba stroje shodná, přesněji řečeno velikost dílčích deformací a celkové deformace jsou u obou strojů stejné.



Obr. 26. Vyobrazení dílčích úběrů obou strojů

Grafické vyjádření průběhu jednotlivých dílčích úběrů pro oba stroje vidíme na **obr. 26**. Podle tvaru křivky se tento typ úběrové řady nazývá klesající.

Hodnoty Δ parametru jsou u prvních čtyř úběrů do 1,25, což odpovídá doporučení dle J. G. Wistreicha (viz **tab. 2.**, kapitola 3.3). Další čtyři úběry mají hodnoty Δ parametru do cca 1,5. Tyto hodnoty jsou v tažírenské praxi bez problému používány. Poslední dva úběry mají hodnoty Δ parametru poněkud vyšší, což je dáno větším vstupním úhlem 2α u diamantových průvlaků. Obecně je známo, že v procesu tažení je ideální vyhnout se hodnotám Δ parametru větším než 3,0 [13]. Na **obr. 27** vidíme křivku znázorňující hodnoty parametru Δ pro jednotlivé úběry.



Obr. 27. Vyobrazení parametru Δ v závislosti na jednotlivých úběrech, stroj A

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

7.1 Analýza výsledků z ekonomického hlediska

7.1.1 Opotřebení průvlaků

V tažirenském provozu, kde byl experiment provozován, je standardně pro různé stroje nastavena pravidelná výměna tažných průvlaků. U strojů, na kterých výzkum probíhal, byla tato výměna stanovena na každý třetí den. V průběhu trvání experimentu byl systém výměny tažných průvlaků upraven. Všechny tažné průvlaky byly po celých 26 dnů trvání experimentu měněny až po dosažení rozměru horní hranice povoleného interního limitu. Jednalo se o prvních osm tahů stroje A a prvních pět tahů stroje B. Diamantové průvlaky, jimiž byly osazeny poslední úběry, zůstaly i nadále měněny standardním způsobem, tedy dle limitu otevření.

Nejprve byly zpracovány výsledky porovnávající spotřebu průvlaků při standardním způsobu výměny a při upraveném způsobu výměny. Jednotlivé výměny průvlaků, které byly prováděny při standardním a při upraveném způsobu u stroje A, můžeme vidět v **tab. 6**. Číslice jedna znamená, že daný den došlo k výměně příslušného průvlaků. Číslice nula znamená, že k výměně průvlaků nedošlo. Zeleně označené buňky představují vyměněný průvlak při standardním způsobu výměny, oranžové buňky představují průvlak vyměněný při upraveném způsobu výměny.

Tab. 6. Srovnání standardního a upraveného způsobu výměny průvleků na stroji A

dobu trvání experimentu (dny)	jednotlivé úběry stroj A															
	1. úběr		2. úběr		3. úběr		4. úběr		5. úběr		6. úběr		7. úběr		8. úběr	
	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
7	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
9	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1
13	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
15	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
16	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
22	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
25	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
26	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
Σ	88	68														

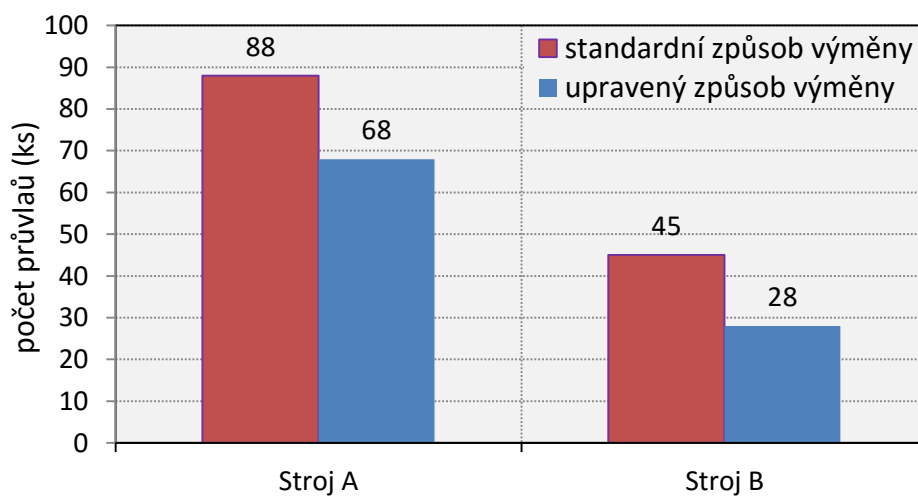
Zhodnocení výsledků zaznamenaných v **tab. 6** je mnohem přehledněji vyobrazeno na **obr. 28**. Z grafu je patrné, že při výměně tažných průvleků pomocí upraveného způsobu výměny došlo ke snížení spotřeby průvleků. Procentuálně se jedná o 22,73 %.

Experiment týkající se výměny tažných tvrdokovových průvleků v závislosti na standardním a upraveném způsobu výměny se u stroje B týkal pouze prvních pěti úběrů. Pro tažení přes další čtyři úběry byla použita technologie vlečného tažení přes mikrokazety a pro poslední úběr byl použit diamantový průvlek, jehož se výzkum netýkal.

Tab. 7. Srovnání standardního a upraveného způsobu výměny průvleků na stroji B

dobu trvání experimentu (dny)	jednotlivé úběry stroj B									
	1. úběr		2. úběr		3. úběr		4. úběr		5. úběr	
	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny	standard. zp. výměny	upravený zp. výměny
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
5	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
16	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
19	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
25	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Σ	45	28								

Obdobně jako u stroje A, je také u stroje B vidět úspora průvleků při nastavení výměny dle upraveného způsobu. U stroje B se hodnotilo pouze pět prvních úběrů a spotřeba průvleků se snížila o 37,78 %. Výsledky spotřeby průvleků zaznamenané v **tab. 7** jsou opět znázorněny v grafu na **obr. 28**.



Obr. 28. Grafické vyobrazení spotřeby průvleků na stroji A a B za období trvání experimentu

7.1.1.1 Dílčí závěr

Úspora v množství průvlaků spotřebovaných na stroji A oproti stroji B byla nižší o 15,05 %. Tento fakt přiřazuji tomu, že na stroji B nebyly hodnoceny úběry s menšími průměry, kde probíhá výměna průvlaků častěji. Důvodem rychlejšího opotřebení průvlaků menších průměrů je, že se při stejné hmotnosti táhne více metrů drátu. Při nákladech na výměnu jednoho přeleštěného průvlaků, jež činí přibližně 4,00 euro, můžeme konstatovat (viz **tab. 8**), že za dobu experimentu bylo na stroji A uspořeno 80 euro a na stroji B 68 euro.

Tab. 8. *Zhodnocení úspor průvlaků v období trvání experimentu*

	zhodnocení úspor při výměně průvlaků na stroji A a stroji B v období trvání experimentu							
	stroj A				stroj B			
	spotřeba průvlaků (ks)	množstevní úspora (ks)	množstevní úspora (%)	finanční úspora (€)	spotřeba průvlaků (ks)	množstevní úspora (ks)	množstevní úspora (%)	finanční úspora (€)
standardní způsob výměny	88				45			
upravený způsob výměny	68	20	22,73	80	28	17	37,78	68

Tab. 9. *Předpoklad úspor průvlaků za období jednoho roku*

	předpoklad úspor při výměně průvlaků na stroji A a stroji B za období jednoho roku							
	stroj A				stroj B			
	spotřeba průvlaků (ks)	množstevní úspora (ks)	množstevní úspora (%)	finanční úspora (€)	spotřeba průvlaků (ks)	množstevní úspora (ks)	množstevní úspora (%)	finanční úspora (€)
standardní způsob výměny	1235				632			
upravený způsob výměny	955	281	22,73	1123	393	239	37,78	955

Předpokládaný výpočet úspor za období jednoho roku na jednom, či druhém stroji vidíme v **tab. 9**. Zaměříme se spíše na stroj B, neboť stejným způsobem jsou osazeny i některé další stroje a předpokládá se rozšíření kombinované technologie tažení i dále. V tomto případě byla za dobu experimentu úspora 37,78 %, z čehož je patrné, že průvlaků, které byly měněny při standardním způsobu výměny, rozhodně nebyly využity na 100 % dle interního nastavení opotřebení.

7.1.2 Srovnání nákladů technologie vlečného tažení a standardní technologie tažení drátu za studena

Jedním z cílů práce bylo zhodnocení konvenční technologie tažení oproti technologii vlečného tažení z ekonomického hlediska. Pro toto vyhodnocení jsem posuzoval pouze čtyři úběry z každého stroje. Jednalo se o stejné úběry, kde na stroji B byly použity mikrokazety pro vlečné tažení a na stroji A byly použity standardní průvlaky. Pro upřesnění, na stroji A byly tři úběry osazeny průvlaky ze slinutých karbidů (tvrdokovový průvlak (TKP)) a jeden úběr byl osazen polykrystalickým diamantovým (PCD) průvlakem (viz **tab. 10**).

Tab. 10. *Popis osazení jednotlivých úběrů u strojů A a B*

	průměry jednotlivých úběrů			
	1,52 mm	1,37 mm	1,24 mm	1,14 mm
stroj A	TKP	TKP	TKP	PCD
stroj B	mikrokazeta	mikrokazeta	mikrokazeta	mikrokazeta

Pro posouzení z ekonomického pohledu bylo potřeba stanovit částku, která by odpovídala kompletní přípravě a kompletaci jedné mikrokazety pro vlečné tažení. Všechny mikrokazety jsou sestaveny pro použití technologie 2+2. V částce je zahrnuta průměrná tržní cena za průvlakové rolky, jejíž výše je ovšem upravena z důvodu možnosti použití opotřebovaných rolek pro osazení do další mikrokazety pro tažení většího průměru, jak je uvedeno v kapitole 5.2. V našem případě se jedna průvlaková rolka po jednotlivých přeleštěních dá použít až čtyřikrát. Dále je zde zahrnuta průměrná tržní cena za válečková ložiska, průměrná částka odpovídající vícenákladům za dodatečné výměny průvlakových rolek a ložisek, částka určující spotřebu kalibračních jehel a diamantové pasty při přebroušení jednotlivých rolek na možnost tažení větších průměrů a také hodinová sazba za práci násobená dobou potřebnou pro přípravu a kompletaci mikrokazety. Souhrn těchto položek je vyobrazen v **tab. 11**.

Tab. 11. *Popis nacenění celkových nákladů mikrokazety*

průměrná tržní cena rolky (€)	průměrná tržní cena ložiska (€)	vícenáklady za výměnu rolek a ložisek (€)	příprava + kompletace mikrokazety (€)	celkové náklady (€)
76	110	319	60	1123

V průběhu trvání experimentu, kdy bylo na stroji B nataženo 306 tun drátu, nebyla potřeba do provozu jednotlivých mikrokazet zasahovat. Jelikož opotřebení jednotlivých mikrokazet trvá podstatně delší dobu, než trval experiment, spočítal jsem průměrné hodnoty životnosti průvleků v období trvání experimentu na stroji A rozdělené dle průměrů drátu a to v závislosti na hmotnosti nataženého drátu v období trvání experimentu. Průvlaky nebyly měněny dle standardního způsobu výměny, ale upraveným způsobem, jak je popsáno v kapitole 7.1.1. Jednotlivé průměrné hodnoty opotřebení vyjádřené v hmotnosti nataženého drátu neboli životnosti průvleků, vidíme v **tab. 12**, označené zeleně.

Tab. 12. *Průměrné hodnoty výměny průvleků dle jednotlivých průměrů drátu (t)*

Ø drátu (mm)	životnost průvleků v období trvání experimentu (t)													průměr (t)
1,52	31,5	25,5	25,5	33	70,5	39	39							37,71
1,37	24	19,5	16,5	22,5	15	18	31,5	19,5	19,5	25,5	27	24	19,5	21,69
1,24	15	31,5	25,5	25,5	18	31,5	19,5	39	40,5	34,5				28,05
1,14	46,5	69	90	73,5										69,75

Pro posouzení spotřeby průvleků z ekonomického hlediska jsem z průměrných hodnot vyměněných průvleků pro jednotlivé průměry drátu (viz **tab. 12**) spočítal počet vyměněných průvleků na 1000 tun nataženého drátu. Následně jsem pro tyto průvlaky vyhodnotil náklady pro příslušné průměry drátu. Výpočet jsem provedl vynásobením počtu vyměněných průvleků na 1000 tun nataženého drátu a náklady za výměnu jednoho prův laku, což činí pro TKP přibližně 4,00 euro a pro PCD okolo 28,00 euro. K těmto nákladům jsem dále připočetl výdaje za spotřebu maziva v průběhu tažení a to pro úběry, kde byly u stroje A použity tvrdokovové průvlaky. U úběru, kde byl použit PCD průvlak, se mazivo nedodávalo. Výdaje za mazivo byly také přepočteny na 1000 tun nataženého drátu. Poslední částka, která byla ještě k nákladům za průvlaky připočtena, jsou náklady za prostoj stroje při výměně jednoho prův laku, jež byly vynásobeny počtem vyměněných prův laků na 1000 tun nataženého drátu pro jednotlivé průměry drátu. Souhrn výše popisovaných nákladů je v **tab. 13**.

Tab. 13. *Popis nacenění celkových nákladů při použití standardní technologie tažení*

typ průvlaku	TKP	TKP	TKP	PCD
Ø drátu (mm)	1,52	1,37	1,24	1,14
přibližná cena za vyměněné průvlaky (€)/1000 tun	106	185	143	401
výdaje za spotřebu maziva v průběhu tažení (€)/1000 tun	155	155	155	0
náklady za prostoj stroje při výměně průvlaků (€)/1000 tun	24	42	32	13
celkové náklady při použití standardní technologie tažení (€)/1000 tun	285	382	330	414

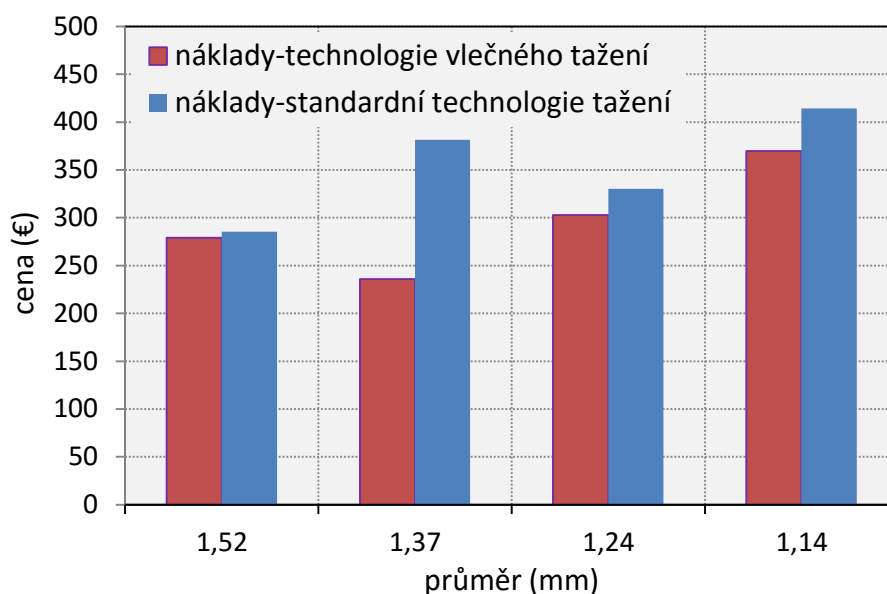
Pro posouzení spotřeby mikrokazet jsem z průměrné hmotnosti nataženého drátu pro opotřebení příslušné mikrokazety, kterou jsem získal z analýzy firemních dat, spočítal počet vyměněných mikrokazet na 1000 tun nataženého drátu, a také vyhodnotil náklady pro jednotlivé spočtené hodnoty u příslušných úběrů. Výpočet jsem opět provedl vynásobením počtu vyměněných mikrokazet na 1000 tun nataženého drátu a celkových nákladů za přípravu a kompletaci jedné mikrokazety určené pro vlečné tažení.

Dochází-li na mikrokazetě k tažení průměru např. 1,14 mm, nastane opotřebení průvlakových rolek mnohem dříve než u mikrokazety, kde se táhne větší průměr drátu. Důvodem je natažení většího počtu metrů při stejné hmotnosti taženého drátu. Ze zákona zachování objemu plyne, že při zmenšujících se průměrech se rychlost tažení zvyšuje a rolky se otáčejí rychleji, čímž se urychluje opotřebení. Znamená to, že mikrokazeta, kde se táhne větší průměr, dokáže zpracovat větší hmotnost taženého drátu. Průměrné hmotnosti nataženého drátu, počty vyměněných průvlaků a mikrokazet na 1000 tun nataženého drátu a kompletní ekonomické zhodnocení využití mikrokazet a průvlaků při tažení pro jednotlivé průměry vidíme v **tab. 14**.

Tab. 14. *Ekonomické zhodnocení při provozování technologie vlečného tažení a standardní technologie tažení*

Ø drátu (mm)	1,52	1,37	1,24	1,14
průměrná hmotnost nataženého drátu pro výměnu průvlastu (t)	37,71	21,69	28,05	69,75
počet vyměněných průvlastů (ks)/1000 tun	26,52	46,10	35,65	14,34
průměrná hmotnost nataženého drátu pro opotřebení mikrokazety (t)	4025,87	4762,15	3706,92	3038,29
počet vyměněných mikrokazet (ks)/1000 tun	0,25	0,21	0,27	0,33
celkové náklady při použití standardní technologie tažení (€)/1000 tun	285	382	330	414
celkové náklady při použití technologie vlečného tažení (€)/1000 tun	279	236	303	370

Pro lepší orientaci jsou výsledky ekonomického zhodnocení zpracovány v grafu (viz **obr. 29**). Jedná se o celkové náklady za mikrokazety a celkové náklady za průvlasty v závislosti na 1000 tun nataženého drátu pro jednotlivé průměry.



Obr. 29. *Vyobrazení ekonomického zhodnocení při provozování technologie vlečného tažení a standardní technologie tažení v závislosti na 1000 tun nataženého drátu pro jednotlivé průměry*

7.1.2.1 Dílčí závěr

Výsledné hodnoty v grafu na **obr. 29** ukazují, že z ekonomického hlediska je použití mikrokazet pro všechny námi vyšetřované průměry výhodnější. U průměru 1,52 mm je finanční rozdíl pouhých 6 € na 1000 tun vyrobeného drátu. Tato skutečnost je způsobena vyššími náklady při použití technologie vlečného tažení pro tento průměr, což vede k vybočení z očekávaného klesajícího trendu od průměru 1,14 mm k vyšším průměrům drátu. Vše se odvíjí od průměrné hmotnosti nataženého drátu pro opotřebení mikrokazety (viz **tab. 14**), kde je vidět růst této hmotnosti od průměru 1,14 mm směrem k vyšším průměrům. U průměru 1,52 mm už k očekávanému nárůstu hmotnosti nataženého drátu nedochází, což je pravděpodobně způsobeno použitím standardní technologie tažení přes průvlaky u předešlého úběru (1,69 mm) v této úběrové řadě. Průměr drátu se při užití standardní technologie tažení z důvodu opotřebení průvlaků (popřípadě zatažení průvlaku) mění více než při výstupu z mikrokazety, což může mít zásadní vliv na životnost mikrokazety, do které tento drát vstupuje. U průměru 1,37 mm nám ze sestupného trendu směrem od průměru 1,14 mm k vyšším průměrům drátu vybočují naopak náklady za užití standardní technologie tažení, což je dáno menší životností průvlaků tohoto průměru v období trvání experimentu. Tento výsledek není zrovna standardní, neboť při větších průměrech se zpracovává méně metrů drátu stejné hmotnosti než při menších průměrech a životnost průvlaků větších průměrů je zpravidla vyšší. Menší životnost průvlaků u průměru 1,37 mm než u průměru 1,24 mm mohla být také ovlivněna různými faktory, kde mě napadá např. špatné chlazení drátu, a proto bych doporučil zkontrolovat technický stav stroje u úběrů 1,37 mm a sledovat opotřebení průvlaků i nadále a získat tak více dat pro přesnější výsledky. Výsledky nákladů technologie vlečného tažení a nákladů standardní technologie tažení u dalších průměrů drátu nepřinesly žádné výrazné překvapení, ale očekával jsem větší finanční rozdíly při posouzení celkových nákladů při provozování obou výše zmíněných technologií.

Pro další ekonomické zhodnocení bych také doporučil započítat do celkových nákladů při použití standardní technologie tažení omezenou rychlost tažení při provozování této technologie.

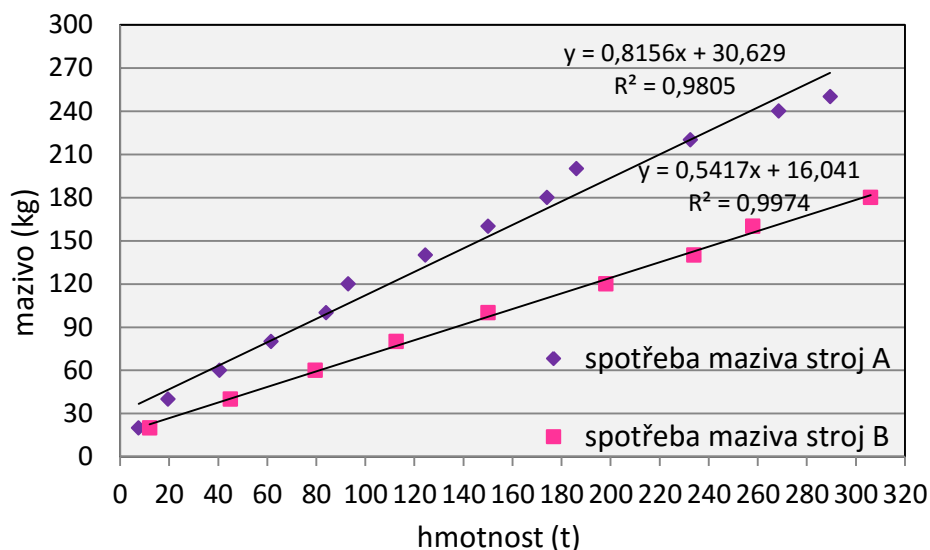
7.1.3 Spotřeba maziva

V rámci experimentu byla také sledována spotřeba maziva na obou strojích. Na stroji A bylo mazivo dodáváno do prvních osmi zásobníků maziva. Na stroji B se mazivo dodávalo pouze do prvních pěti zásobníků maziva, další čtyři úběry byly osazeny mikrokazetami a při technologii vlečného tažení se mazivo v meziúběrech nepoužívá. U úběrů, kde byl diamantový průvlak, se mazivo do zásobníků také nedodávalo. Zpracované výsledky jsou zaznamenány v **tab. 15**.

Tab. 15. *Výsledky spotřeby maziva na stroji A a B*

spotřeba maziva stroj A			spotřeba maziva stroj B		
počet dní	kumulovaná spotřeba maziva (kg)	hmotnost vyrobeného drátu (t)	počet dní	kumulovaná spotřeba maziva (kg)	hmotnost vyrobeného drátu (t)
1	20	7,5	1	20	12,0
2	40	19,5	2		24,0
3		30,0	3		36,0
4	60	40,5	4	40	45,0
5		51,0	5		57,0
6	80	61,5	6		69,0
7		73,5	7	60	79,5
8	100	84,0	8		91,5
9	120	93,0	9		100,5
10		100,5	10	80	112,5
11		112,5	11		124,5
12	140	124,5	12		136,5
13		136,5	13	100	150,0
14	160	150,0	14		160,5
15		162,0	15		174,0
16	180	174,0	16		186,0
17	200	186,0	17	120	198,0
18		198,0	18		210,0
19		208,5	19		222,0
20		220,5	20	140	234,0
21	220	232,5	21		246,0
22		244,5	22	160	258,0
23		256,5	23		271,5
24	240	268,5	24		283,5
25		280,5	25		295,5
26	250	289,5	26	180	306,0

Spotřeba maziva byla porovnávána v závislosti na hmotnosti vyrobeného drátu u obou sledovaných strojů a její rozdílný průběh vidíme na **obr. 30**.



Obr. 30. *Průběh spotřeby maziva na stroji A a B v závislosti na hmotnosti vyrobeného drátu*

7.1.3.1 Dílčí závěr

Jelikož se mazivo na stroji A používalo pro více úběrů, než na stroji B, je výsledek spotřeby maziva dle očekávání. Tato kapitola se ovšem zabývá analýzou výsledku z ekonomického pohledu, a proto je třeba vyjádřit výši finanční úspory. Při průměrné ceně maziva 2,00 € za kilogram je finanční úspora na jednom stroji vyjádřena v **tab. 16** a **tab. 17**.

Tab. 16. *Zhodnocení úspor v období trvání experimentu*

	zhodnocení spotřeby maziva na stroji A a B v období trvání experimentu		
	spotřeba (kg)	množstevní úspora (kg)	finanční úspora (€)
stroj A	250		
stroj B	180	70	140

Tab. 17. *Předpoklad úspor za období jednoho roku*

	zhodnocení spotřeby maziva na stroji A a B v období jednoho roku		
	spotřeba (kg)	množstevní úspora (kg)	finanční úspora (€)
stroj A	3510		
stroj B	2527	983	1966

7.2 Analýza výsledků z mechanického hlediska

7.2.1 Zbytkové mazivo

Měření množství zbytkového maziva na drátu jsem prováděl ve firemní laboratoři. Metoda měření zbytkového maziva je založena na trojím vážení vzorků drátu jednotlivých úběrů, kdy za pomoci chemických roztoků dochází k postupnému odstraňování jednotlivých vrstev maziva na drátu.

Měření hmotnosti vzorků drátu probíhalo na analytické váze Precisio 303A s přesností na desetitisíciny gramů. Nejdříve jsem na vzorcích drátu odebraných ze stroje změřil průměr d a provedl jsem první vážení – hmotnost A_1 . Poté jsem vzorky otřel pomocí ubrousku, který byl napuštěný chemickou látkou, čímž jsem odstranil volnou složku maziva a vzorky opět zvážil – hmotnost A_2 . Po zaznamenání zvážených hodnot jsem vzorky ponořil na 20 sekund do chemického roztoku, čímž došlo k odstranění pevné složky maziva. Vzorky jsem potom opláchnul a patřičně vysušil. Následně jsem provedl další vážení – hmotnost A_3 . Pomocí vzorců, příslušných pro tuto metodu měření zbytkového maziva jsem z navážených hmotností spočítal hmotnost volné složky B_1 :

$$B_1 = ((A_1 - A_2) \cdot d \cdot \rho) / 4 \cdot A_2 , \quad (22)$$

a hmotnost pevné složky B_2 zbytkového maziva na drátu:

$$B_2 = ((A_2 - A_3) \cdot d \cdot \rho) / 4 \cdot A_3 , \quad (23)$$

kde ρ v rovnicích vyjadřuje hustotu železa. Obě hmotnosti jsem nakonec sečetl pro získání celkové hmotnosti zbytkového maziva B_c :

$$B_c = B_1 + B_2 . \quad (24)$$

Naměřené a spočtené hodnoty pro jednotlivé úběry stroje A jsou vyobrazeny v **tab. 18**.

Tab. 18. *Hodnoty zbytkového maziva na drátu stroj A*

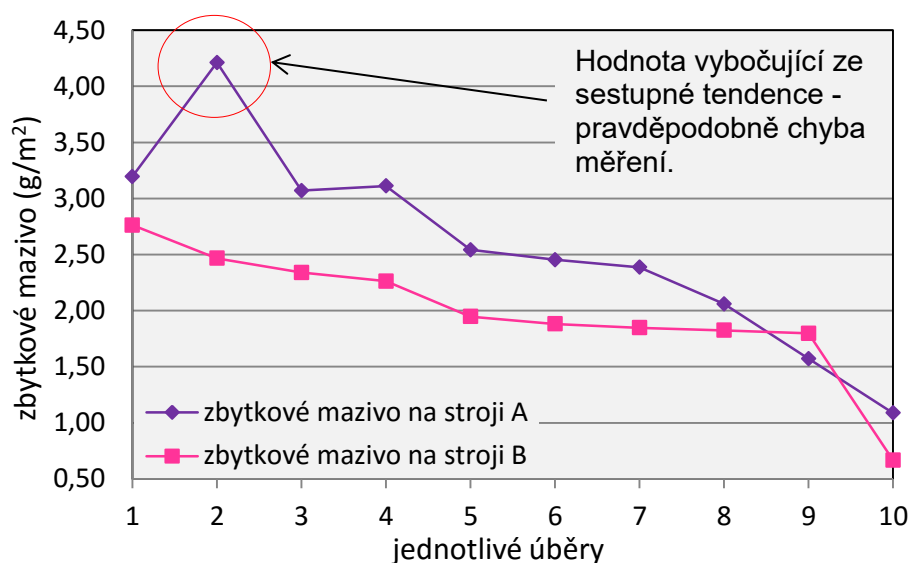
	jednotlivé úběry									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_1 (g)	33,7782	24,0124	17,5750	13,5299	11,5742	9,6941	7,9694	6,4522	5,5278	4,5348
A_2 (g)	33,7663	23,9981	17,5668	13,5223	11,5683	9,6885	7,9648	6,4484	5,5254	4,5338
A_3 (g)	33,7587	23,9914	17,5622	13,5186	11,5653	9,6861	7,9623	6,4467	5,5239	4,5324
d (mm)	2,819	2,452	2,147	1,897	1,684	1,514	1,364	1,231	1,135	1,048
B_1 (g/m ²)	1,9497	2,8674	1,9668	2,0924	1,6855	1,7174	1,5460	1,4236	0,9675	0,4536
B_2 (g/m ²)	1,2455	1,3438	1,1036	1,0189	0,8573	0,7362	0,8405	0,6371	0,6049	0,6353
B_c (g/m ²)	3,1952	4,2113	3,0704	3,1113	2,5428	2,4536	2,3865	2,0607	1,5724	1,0889

Naměřené a spočtené hodnoty pro jednotlivé úběry stroje B jsou vyobrazeny v **tab. 19**.

Tab. 19. *Hodnoty zbytkového maziva na drátu stroj B*

	jednotlivé úběry									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_1 (g)	13,0222	8,9816	8,6272	6,0875	4,5746	3,7763	4,9095	4,1113	4,3908	3,6958
A_2 (g)	13,0185	8,9785	8,6240	6,0848	4,5728	3,7745	4,9073	4,1089	4,3875	3,6948
A_3 (g)	13,0157	8,9770	8,6224	6,0838	4,5719	3,7739	4,9061	4,1082	4,3873	3,6946
d (mm)	2,818	2,453	2,142	1,896	1,680	1,508	1,359	1,232	1,148	1,047
B_1 (g/m ²)	1,5718	1,6621	1,5598	1,6511	1,2978	1,4113	1,1957	1,4122	1,6945	0,5561
B_2 (g/m ²)	1,1897	0,8044	0,7800	0,6116	0,6490	0,4705	0,6523	0,4120	0,1027	0,1112
B_c (g/m ²)	2,7615	2,4665	2,3399	2,2627	1,9468	1,8818	1,8480	1,8242	1,7972	0,6673

Výsledky v tabulkách ukazují, že hodnoty zbytkového maziva na drátu jsou v průběhu úběrové řady nižší na stroji B než na stroji A, což je patrné z grafu na **obr. 31**. Maximální rozdíl mezi oběma křivkami činí 0,85 g/m². Bod v grafu, který je v červeném kruhu, vybočuje ze sestupné tendence hodnot zbytkového maziva na drátu u stroje A. Jelikož vzorky drátu pro měření zbytkového maziva byly odebrány při stejném opotřebení průvlaků, můžeme tuto hodnotu vyloučit a označit ji jako chybu měření.

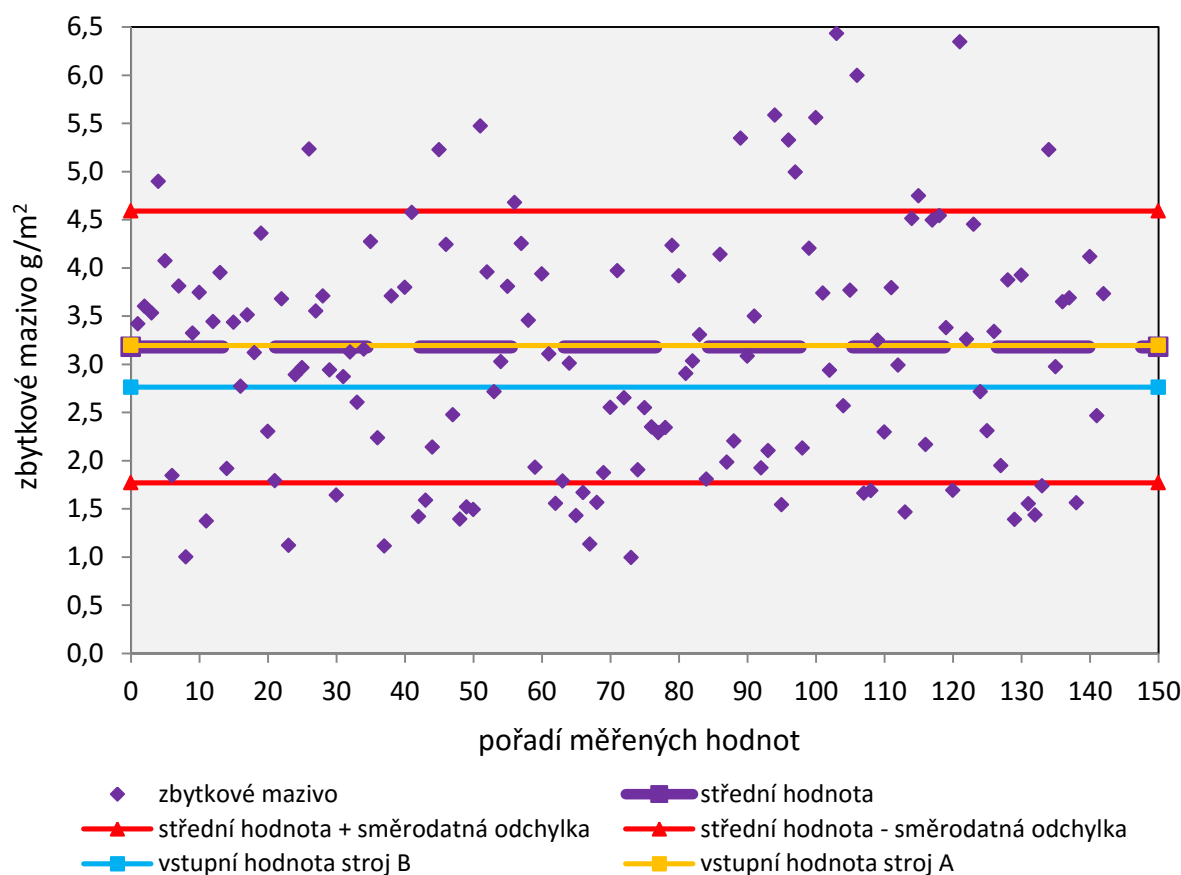


Obr. 31. Hodnoty hmotnosti zbytkového maziva na drátu u stroje A a stroje B

Pro prvních pět úběrů, kde byla používána u obou strojů standardní technologie tažení, je průběh křivek dosti podobný. Nabízí se ovšem otázka, proč jsou hodnoty zbytkového maziva na drátu po těchto úběrech u stroje B položeny níže než u stroje A. Odpověď na tuto otázku jsem se snažil najít na vstupním předtaženém drátu. V **tab. 20** vidíme popisnou statistiku pro 142 výsledků měření zbytkového maziva na předtaženém drátu průměru 3,26 mm, které jsem získal z historických firemních dat. Střední hodnota, která je 3,18 g/m² a směrodatná odchylka, která vychází 1,41 g/m² naznačují, že za předpokladu normálního rozdělení pravděpodobnosti se bude v rozsahu od 1,77 do 4,59 g/m² pohybovat cca 68 % hodnot hmotnosti zbytkového maziva na vstupním předtaženém drátu (viz **obr. 32**). Z toho plyne, že rozdíl mezi hodnotami naměřeného množství zbytkového maziva na drátu mezi stroji A a B je statisticky nevýznamný.

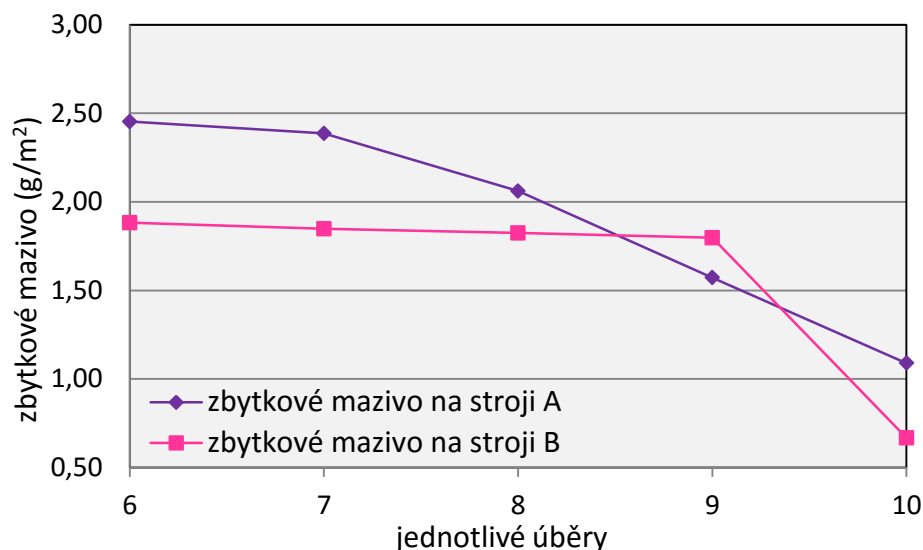
Tab. 20. Popisná statistika hodnot zbytkového maziva na drátu průměru 3,26 mm

popisná statistika	
střední hodnota	3,1802
chyba střední hodnoty	0,1184
medián	3,0950
směrodatná odchylka	1,4108
rozptyl výběru	1,9903
špičatost	1,1392
šikmost	0,8689
minimum	0,9923
maximum	8,2324
součet	451,5857
počet	142



Obr. 32. Grafické vyobrazení hodnot zbytkového maziva na vstupním předtaženém drátu a vyobrazení vybraných hodnot popisné statistiky

Důležitější a celkem překvapivý údaj je, že u úběru, kde byly na stroji B umístěny mikrokazety pro vlečné tažení, a jak již bylo zmíněno v kapitole 5.3, není mezi tyto úběry dodáváno mazivo, dosahují hodnoty zbytkového maziva téměř rovnoměrných výsledků. Naopak u stroje A, kde probíhalo standardní tažení přes průvlaky, a kde bylo mezi jednotlivými úběry mazivo dodáváno, dosahují hodnoty zbytkového maziva sestupné tendence. Výsledné hodnoty zbytkového maziva po jednotlivých úběrech pro celou úběrovou řadu na stroji A a stroji B vidíme na **obr. 31**. Hodnoty zbytkového maziva týkající se pouze úběrů, kde byly pro tažení na stroji B použity mikrokazety a na stroji A standardně průvlaky vidíme na **obr. 33**.



Obr. 33. Hodnoty zbytkového maziva na stroji A a stroji B pro vybrané úběry

7.2.1.1 Dílčí závěr

Důvodem minimální sestupné tendence množství zbytkového maziva na drátu u vlečného tažení je pravděpodobně nízká hodnota tření mezi povrchem drátu a průvlakovými rolkami. Pokud by se technologií vlečného tažení osadil celý stroj, byly by hodnoty zbytkového maziva závislé pouze na množství maziva na vstupním materiálu. Dá se usuzovat, že hodnoty zbytkového maziva v průběhu celého tažení by měly jen mírně sestupnou tendenci s poklesem první až poslední tah cca 0,5 g/m². Výsledky hmotnosti zbytkového maziva na drátu byly získány jen jedním měřením a to z důvodu, že pro odebrání vzorků je potřeba zastavit a vystříhat celý stroj, což je časově a ekonomicky velice náročné. Pro věrohodnost výše zmíněných výsledků bych doporučil provést další měření a výsledky porovnat.

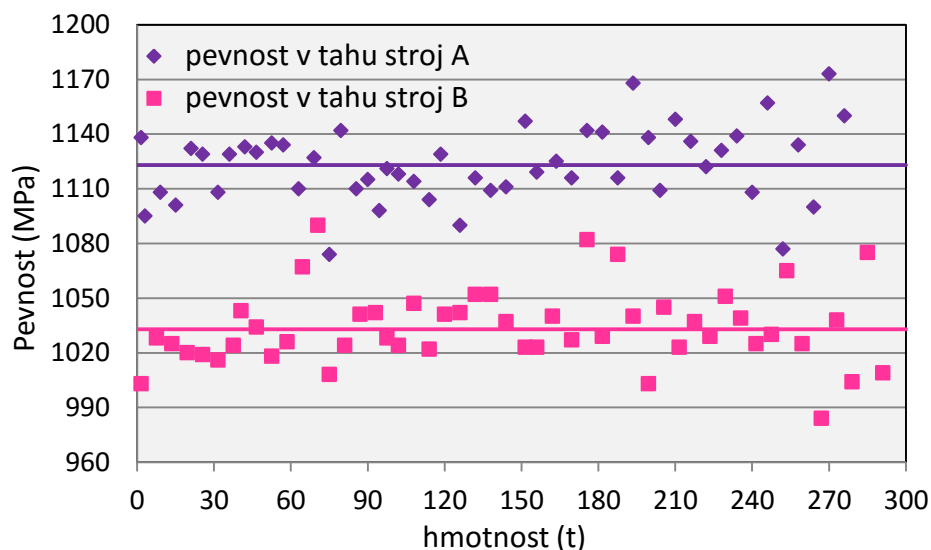
7.2.2 Pevnost v tahu po posledním úběru

V průběhu experimentu jsem vyhodnocoval pevnost po posledním úběru u strojů A a B. Výsledné hodnoty pevnosti materiálu jsem získal prováděním tahové zkoušky za pokojové teploty dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Výsledky pevnosti z padesáti vzorků ze stroje A a stejného počtu ze stroje B odebíraných v průběhu celého experimentu a hodnocených v závislosti na hmotnosti nataženého drátu jsou k vidění v **tab. 21**.

Tab. 21. *Výsledné hodnoty pevnosti v tahu po posledním úběru na stroji A a B*

Pevnost v tahu po posledním úběru (Mpa)							
Stroj A				Stroj B			
kumulovaná hmotnost nataženého drátu (t)	Rm (Mpa)	kumulovaná hmotnost nataženého drátu (t)	Rm (Mpa)	kumulovaná hmotnost nataženého drátu (t)	Rm (Mpa)	kumulovaná hmotnost nataženého drátu (t)	Rm (Mpa)
1,5	1138	132,0	1116	1,5	1003	144,0	1037
3,0	1095	138,0	1109	7,5	1028	151,5	1023
9,0	1108	144,0	1111	13,5	1025	156,0	1023
15,0	1101	151,5	1147	19,5	1020	162,0	1040
21,0	1132	156,0	1119	25,5	1019	169,5	1027
25,5	1129	163,5	1125	31,5	1016	175,5	1082
31,5	1108	169,5	1116	37,5	1024	181,5	1029
36,0	1129	175,5	1142	40,5	1043	187,5	1074
42,0	1133	181,5	1141	46,5	1034	193,5	1040
46,5	1130	187,5	1116	52,5	1018	199,5	1003
52,5	1135	193,5	1168	58,5	1026	205,5	1045
57,0	1134	199,5	1138	64,5	1067	211,5	1023
63,0	1110	204,0	1109	70,5	1090	217,5	1037
69,0	1127	210,0	1148	75,0	1008	223,5	1029
75,0	1074	216,0	1136	81,0	1024	229,5	1051
79,5	1142	222,0	1122	87,0	1041	235,5	1039
85,5	1110	228,0	1131	93,0	1042	241,5	1025
90,0	1115	234,0	1139	97,5	1028	247,5	1030
94,5	1098	240,0	1108	102,0	1024	253,5	1065
97,5	1121	246,0	1157	108,0	1047	259,5	1025
102,0	1118	252,0	1077	114,0	1022	267,0	984
108,0	1114	258,0	1134	120,0	1041	273,0	1038
114,0	1104	264,0	1100	126,0	1042	279,0	1004
118,5	1129	270,0	1173	132,0	1052	285,0	1075
126,0	1090	276,0	1150	138,0	1052	291,0	1009

Z výsledků je na první pohled patrné, že pevnost v tahu po posledním úběru se u vzorků ze stroje A pohybuje ve vyšších hodnotách, než u stroje B. Ze spočtených průměrů výsledných hodnot ze stroje A a stroje B se jedná o rozdíl 90 MPa, což představuje fialová a růžová čára v grafu na **obr. 34**.



Obr. 34. Hodnoty pevnosti v tahu po posledním úběru u stroje A a stroje B

7.2.2.1 Dílčí závěr

Jelikož vstupní materiál byl pro oba stroje stejný a velikosti dílčích deformací a celkové deformace byly také totožné, je třeba hledat důvod rozdílných hodnot pevnosti v tahu po posledním úběru v odlišných technologiích tažení použitých pro stroj A a pro stroj B. Z tohoto důvodu jsem provedl vyhodnocení pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech v průběhu tažení u obou sledovaných strojů. Více v kapitole 7.2.3.

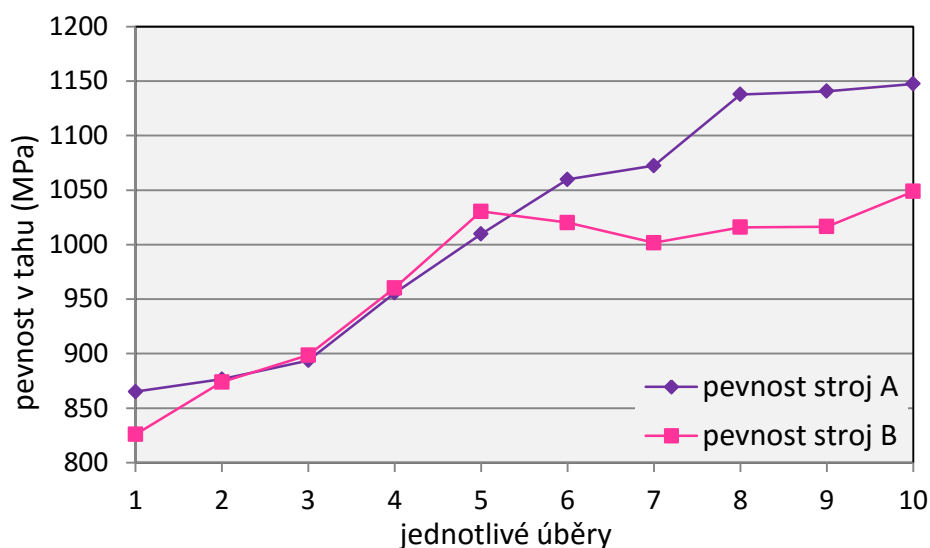
7.2.3 Pevnost v tahu po jednotlivých úběrech

Dle výsledků z minulé kapitoly jsem z naměřených hodnot pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech na stroji A a stroji B (viz **tab. 22**) očekával mírnější průběh nárustu pevnosti u stroje B.

Tab. 22. Výsledné hodnoty pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech na stroji A a B

	pevnost v tahu po jednotlivých úběrech u stroje A a stroje B (MPa)										
	jednotlivé úběry										
	vstup	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
stroj A	773	865	877	894	956	1010	1060	1072	1138	1141	1147
stroj B	751	826	874	899	960	1030	1020	1002	1016	1016	1049

Výsledky pevnosti po jednotlivých úběrech ze stroje A ukázaly standardní průběh zvyšování pevnosti v tahu pro konvenční tažení za studena. U stroje B docházelo k postupnému zvyšování pevnosti v tahu pouze u prvních pěti úběrů, podobně jako u stroje A. Avšak u úběrů, kde byla použita technologie vlečného tažení přes mikrokazety, již ke zvyšování pevnosti nedocházelo. Mírný nárůst pevnosti nastal až po posledním úběru, kde byl použit diamantový průvlak (viz **obr. 35**).



Obr. 35. Hodnoty pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech na stroji A a B

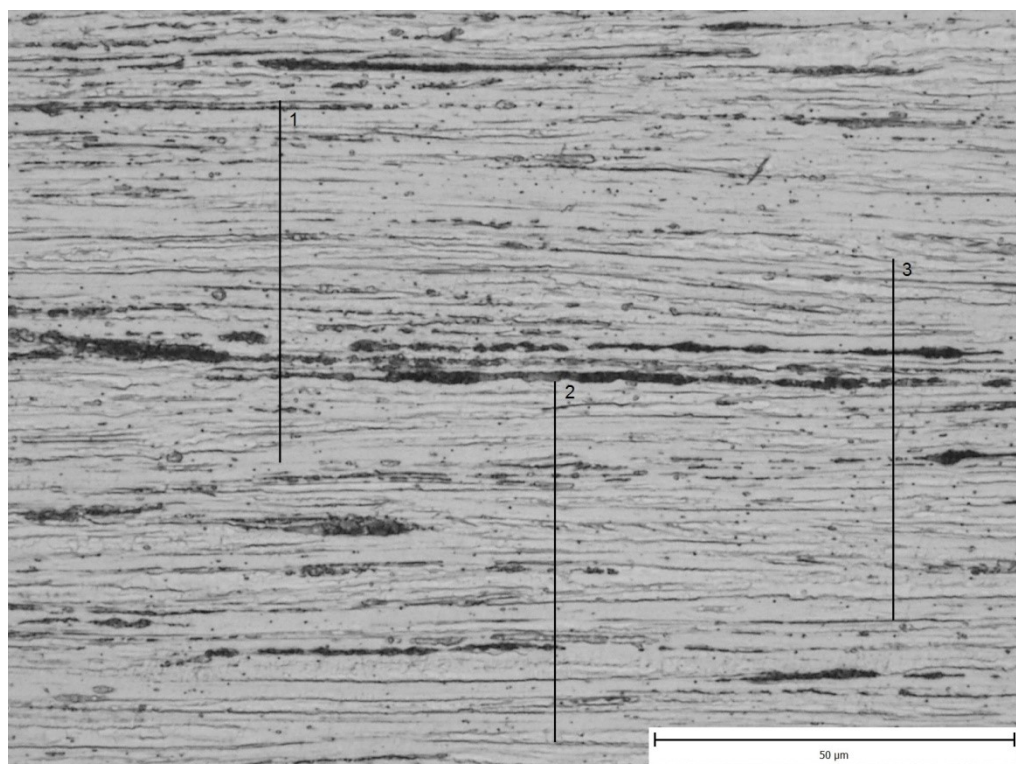
7.2.3.1 Dílčí závěr

Nezpevňování materiálu při vlečném tažení přes mikrokazety je způsobeno rozdílnou deformací, zapříčiněnou protahováním drátu skrz průvlakové rolky. Nejprve se drát kruhového průřezu deformuje za vzniku oválu. Při této deformaci dochází k příčnému toku kovu, což si můžeme představit jako šíření při válcování. Zrna se neprotahují pouze ve směru tažení, ale také v příčném směru a zpevňování neprobíhá jako u standardního tažení přes průvlak. Dalším faktorem, který může přispívat k nezpevňování drátu při vlečném tažení, může být absence smykové deformace, v jejímž důsledku dochází také ke zpevňování materiálu.

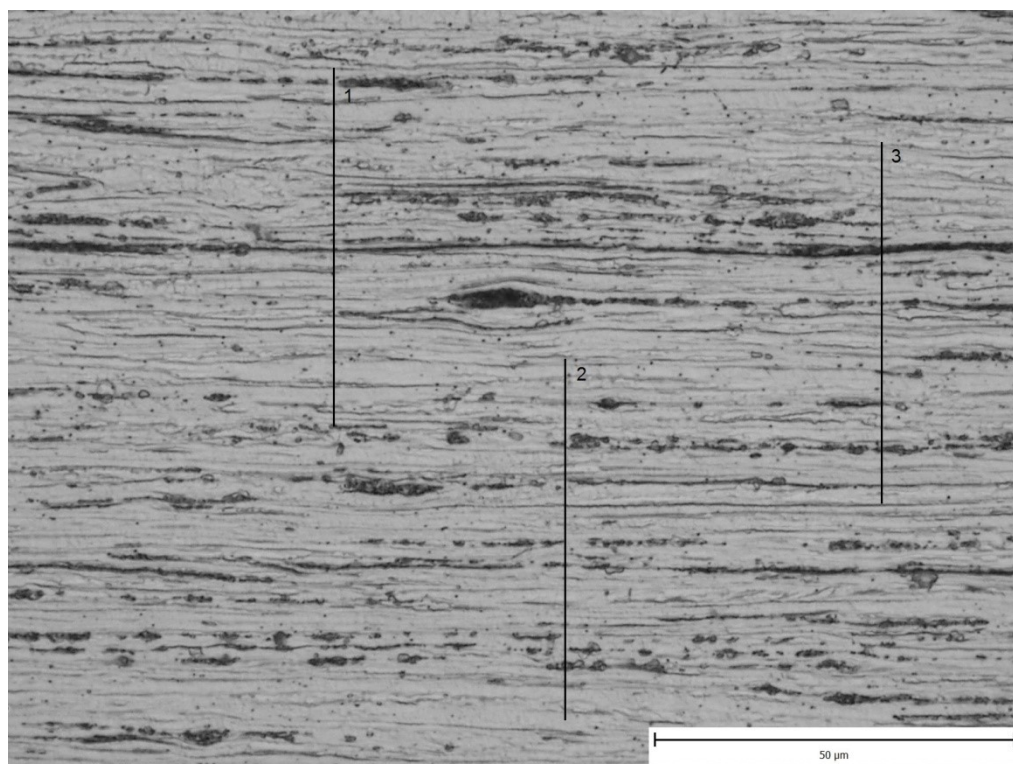
Pokud bychom chtěli rozšířit technologii vlečného tažení také na další úběry ve stroji, museli bychom pravděpodobně použít vstupní materiál s pozměněným chemickým složením (např. s vyšším obsahem uhlíku), abychom mohli garantovat požadovanou pevnost v tahu po posledním úběru.

7.2.4 Mikrostruktura drátu

Pro vyhodnocení mikrostruktury drátu taženého standardní technologií a technologií vlečného tažení jsem odebral drát z předposledního úběru u stroje A a stroje B. Na snímcích pořízených z metalografických vzorků (viz **obr. 36** a **obr. 37**), kde byl proveden podélný řez u průměru 1,14 mm, bohužel nevidíme žádný výrazný rozdíl, nejsou zde vidět skluzové pásy a ztrácí se také hranice zrn. Drát už byl ve vysoké fázi deformace a vidíme pouze splnutí protažených zrn ve směru tažení, zdeformované útvary perlitu a vměstky.



Obr. 36. Předposlední úběr stroj A, průměr 1,14 mm, podélný řez, zvětšení 1000x



Obr. 37. Předposlední úběr stroj B, průměr 1,14 mm, podélný řez, zvětšení 1000x

7.2.4.1 Dílčí závěr

Pomocí tří libovolně vložených úseček do jednotlivých snímků jsem stanovil průměrnou šířku zrna mikrostruktury drátu pro stroj A a stroj B. Úsečky mají délku 50 μm dle měřítka a jsou označeny číslicemi 1, 2 a 3. Po délce každé úsečky jsem spočítal počet protažených zrn, tento počet jsem zprůměroval a následně jsem vypočítal průměrnou šířku zrna mikrostruktury drátu pro stroj A a stroj B (viz **tab. 23**).

Tab. 23. Výsledné hodnoty výpočtu průměrné šířky zrna mikrostruktury drátu pro stroj A a stroj B

	stroj A		stroj B	
	počet zrn (ks)	průměrná šířka zrna (μm)	počet zrn (ks)	průměrná šířka zrna (μm)
úsečka č. 1	29	1,60	28	1,85
úsečka č. 2	31		26	
úsečka č. 3	34		27	

U stroje B, kde byla použita technologie vlečného tažení, vyšla průměrná šířka zrna větší o 0,25 μm , což může být způsobeno již zmíněným rozdílným stavem deformace při užití technologie vlečného tažení, kde dochází k našíření materiálu v průběhu jednotlivých úběrů.

Pro další zpřesnění informací ohledně mikrostruktury bych doporučil také pořídit snímky z metalografických podélných výbrusů, orientovaných kolmo na mnou sledované snímky. Srovnáním těchto pohledů na mikrostrukturu by bylo možno porovnat šířku a výšku zrn v drátech pro jednotlivé technologie.

Přínosem by určitě bylo porovnání orientace zrn a charakter subzrn u příslušných vzorků pomocí metody EBSD. Tato metoda je založena na difrakci zpětně odražených elektronů. Jelikož při užití technologie vlečného tažení drátu dochází při deformaci v prvním meziúběru k šíření materiálu, měla by být textura takto taženého drátu méně homogenní, než textura drátu taženého standardní technologií.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnat a na základě shromážděných dat vyhodnotit, za jakých podmínek by bylo možno použít technologii vlečného tažení drátu dále do výroby. Hodnocení dat probíhalo jednak z technologicky-ekonomického hlediska a také z materiálového hlediska. Vyhodnocená data přinesla nové poznatky při použití technologie vlečného tažení, z níž byly některé celkem překvapující.

Zpracovaná data ohledně technologie vlečného tažení přinesla dle našeho očekávání z ekonomického pohledu příznivé výsledky, avšak výše úspor u jednotlivých průměrů drátu byla poněkud rozdílná. Celková úspora pro všechny posuzované průměry drátu vypočtená z průměrných celkových nákladů obou technologií tažení na 1000 tun nataženého drátu činí 16 %. Technologie vlečného tažení má oproti konvenčnímu tažení přes průvlakky také výhodu možnosti tažení drátu vyššími rychlostmi, což v provozu kde probíhal experiment potvrzuje pro tyto stroje navýšení rychlosti o 300 m/min. Doporučoval bych vysledovat rozdíl v rychlostech tažení z finančního hlediska a začlenit tento údaj do ekonomického posouzení. V minulosti bylo také dosaženo výrazného zlepšení v oblasti mazání ložisek, což povede k dalším úsporám a dá se předpokládat, že technologie vlečného tažení má i nadále ještě velký potenciál pro zlepšování.

Z hlediska ekonomického zhodnocení bych navrhoval také vyhodnotit spotřebu elektrické energie elektromotorů pohánějících tažné bubny pro jednotlivé úběry, kde byla použita na jednom stroji standardní technologie tažení přes průvlakky a na stroji druhém technologie vlečného tažení přes průvlakové rolky v mikrokazetě.

Výsledky pevnosti v tahu po posledním úběru a následné vyhodnocení pevnosti v tahu po jednotlivých úběrech u stroje, kde byla použita technologie vlečného tažení jasně ukazují, že technologie vlečného tažení díky rozdílnému stavu deformace oproti standardní technologii tažení přes průvlakky výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Nezpevňování materiálu v průběhu tažení přes mikrokazety vede k nižší pevnosti v tahu po posledním úběru. Experiment ukázal, že osazením čtyř úběrů v desetitažném stroji technologií vlečného tažení došlo u nízkouhlíkové oceli ke snížení pevnosti v tahu po posledním úběru v průměru o 90 MPa.

Navrhují použití technologie vlečného tažení také na další úběr ve stroji, kde je tato technologie již provozována a otestování vstupního materiálu s upraveným chemickým složením (např. navýšení obsahu C), abychom po posledním úběru získali požadovanou pevnost v tahu.

Dále doporučuji otestovat houževnatost materiálu, neboť je možné, že z důvodu rozdílné deformace při užití technologie vlečného tažení nabyde drát odlišnou houževnatost než při užití standardní technologie tažení.

Celkově vidím technologii vlečného tažení jako přínos do tažírenského provozu. Je zde ovšem ještě spousta prostoru pro testování a pravděpodobně i pro optimalizaci této technologie, které povedou k dalšímu rozšíření do výroby.

9 LITERATURA

- [1] RUSZ, S., DONIČ, T., *Sborník přednášek 11. Mezinárodní conference metalurgie a materiálů METAL 2002. Problematika tvařitelnosti mikrolegované šroubové oceli.* [online]. 2002. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://konference.tanger.cz/data/metal2002/sbornik/papers/165.pdf>>.
- [2] Brnřina. *Historické průvlaky pro tažení drátu.* [online]. 2011. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://brnirina.blogspot.cz/2011/09/historicke-pruvlaky-pro-tazeni-dratu.html>>.
- [3] MARCOL, J. a kolektiv, *Tažený ocelový drát 1. a 2. díl.* Bohumín: ŽDB a. s., 1996. 500 s.
- [4] KLIBER, J., *Základy tváření kovů.* 3. vydání. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008. 278 s. ISBN 978-80-248-1794-1.
- [5] MARCOL, J., *Příspěvek k problematice výroby ocelového drátu.* Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ a. s., 1992. 68 s. ISSN 0322-8525.
- [6] BAČA, M., MORAVEC, E., *Příspěvek k problematice teorie tažení drátu.* Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ, účelová organizace, 1987. 41 s. ISSN 0322-8525.
- [7] PŘIKRYL, J., STEJSKAL, E., *Tažení.* Výťah z knihy I. A. Juchvece, Voločilnoje proizvodstvo. Nový Bohumín: Generální ředitelství Hutní druhovýroba, oborové středisko vědeckotechnických informací a patent, 180 s.
- [8] ENGHAG, P., *Steel wire technology. Applied materials technology. Materialtechnik HB.* Edition No 3. 2003. ISBN 91-631-1962-5.
- [9] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., *Tváření oceli.* 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988. 520 s.
- [10] BENEŠOVÁ, S., *Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů.* Plzeň, 2007. 119 s. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.

- [11] FABÍK, R., *Studijní opora. Vybrané kapitoly z tváření kovů kapitoly. 1-10*. [online]. 2008. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.fmfi.vsb.cz/cs/katedry-a-pracoviste/633/vyukove-opory-katedry/index.html>>.
- [12] AVITZUR, B., *Metal Forming: Processes and Analysis*. United States of America: McGraw-Hill Series in Materials Science and Engineering, 1968. 500 s.
- [13] *Stránky společnosti Antaac*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.antaac.org.mx/descargas/TheoryOfWireDrawing.pdf>>.
- [14] BAČA, M., MORAVEC, E., *Průvlaky pro tažení ocelových drátů*. Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ, účelová organizace, 1984. 48 s. ISSN 0322-85-25.
- [15] LUKSZA, J., SADOK, L., *Wybrane zagadnienia z ciągarnstwa*. Kraków: AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. S. STASZICA W KRAKOWIE, 1983. 185 S.
- [16] *Stránky Politechniky Wrocławské*. [online]. 2014. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/pliki/lab5.pdf>>.
- [17] Wright, R. N., *Wire technology: Process Engineering and Metallurgy*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2011, 320 p. ISBN 978-0-12-382092-1.
- [18] *Stránky společnosti Paramount Die*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <http://draft.paradise.com/public_html/ProductsPPS.html>.
- [19] FABÍK, R., NÉTEK, V., KOCICH, R. *Machine modeling and simulations*. Medvecký Štefan. Žilina : Scientific and Technical Society at the University of Žilina Press, 2009. ISBN 978-80-89276-18-9. PC simulation of wire rod for steel tire cords drawing, s. 45-52.
- [20] CAO, T.-S., VACHEY, C., MONTMITONNET, P., BOUCHARD, P.-O., *Journal of Materials Processing Technology. Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage (3+3, 2+2)*. [online]. 2015. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW: <http://ac.els-cdn.com/S0924013614003872/1-s2.0-S0924013614003872-main.pdf?_tid=ba07c8b6-0676-11e6-9f5b-00000aabb0f6b&acdnat=1461101947_2ad2000ac1bcaa38be668f56e8e1b8c7>.
- [21] PILARCZYK, J. W., VAN HOUTTE, P., AERNOUDT, E., *Materials Science and Engineering. Effect of hydrodynamic and roller die drawing on the texture of*

high carbon steel wires. [online]. 1995. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW:
<[http://ac.els-cdn.com/0921509394097569/1-s2.0-0921509394097569-
main.pdf?_tid=0e176484-0677-11e6-ab87-
00000aacb361&acdnat=1461102088_401673e3cc559032e1cc915a395b8d1f](http://ac.els-cdn.com/0921509394097569/1-s2.0-0921509394097569-main.pdf?_tid=0e176484-0677-11e6-ab87-00000aacb361&acdnat=1461102088_401673e3cc559032e1cc915a395b8d1f)>.

[22] *Stránky společnosti EUROLLS*. [online]. 2014. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW:
<<http://www.eurolls.com/en/main/products/wire-products>>.

[23] *Stránky společnosti DEM Group*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW:
<<http://www.demgroup.com/products.php>>.

[24] *Stránky společnosti DDM GmbH*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z WWW:
<http://www.ddmgermany.de/pdf/ddm_bro_walzkassette_int_screen.pdf>.